

DISEÑO Y MODELACIÓN DE CADENAS DE SUMINISTRO CONFIABLES

ÁLVARO MIGUEL SIERRA ALTAMIRANDA

BARRANQUILLA

UNIVERSIDAD DEL NORTE

DIVISIÓN DE POSTGRADOS E INVESTIGACIONES EN INGENIERIA

MAESTRIA EN INGENIERIA INDUSTRIAL

2011

DISEÑO Y MODELACIÓN DE CADENAS DE SUMINISTRO CONFIABLES

ÁLVARO MIGUEL SIERRA ALTAMIRANDA

PROYECTO DE GRADO

ING. RENE AMAYA MIER, PH.D.

ING. JOHANNA AMAYA LEAL, M.Sc.

DIRECTORES

BARRANQUILLA

UNIVERSIDAD DEL NORTE

DIVISIÓN DE POSTGRADOS E INVESTIGACIONES EN INGENIERIA

MAESTRIA EN INGENIERIA INDUSTRIAL

2011

DEDICATORIA

Este trabajo esta dedicado a mis padres Álvaro y Mayra, gran fuente de inspiración y sabiduría para la consecución de todas mis metas. Mi hermana Aileen que no ha dejado de creer en mí ni un solo instante. Mi abuela Edith quien ha sido mi madre sustituta todos estos años, mi tía Yenny y para el resto de mi familia que siempre me ha apoyado y cuidado.

AGRADECIMIENTOS

Agradecer de antemano a Dios por dotarme de las capacidades necesarias para la realización de este proyecto. Gracias a su guía constante puedo decir que he cumplido un sueño.

A mis padres Álvaro Sierra y Mayra Altamiranda les doy las gracias por el apoyo recibido durante todo este proceso, por las palabras de ánimo en los momentos difíciles, porque nunca perdieron la confianza, por demostrarme constantemente lo orgullosos que se sienten de mí, por su gran esfuerzo y por sus múltiples sacrificios que finalmente han valido la pena.

A mis directores Johanna Amaya Leal y Rene Amaya Mier por todo su apoyo en la creación, desarrollo y consecución de este proyecto de investigación. Por sus directrices que le dieron forma a este trabajo, por dotarme de las herramientas necesarias para el aprendizaje y la generación de conocimiento, y por aportarme de su sabiduría.

A mis amigos Daniel Romero Rodríguez y Fernando González Solano por su apoyo constante e incondicional, por acompañarme durante todo el proceso de la maestría, por sus recomendaciones, sabios consejos y por brindarme la oportunidad de trabajar juntos en el desarrollo de este proyecto.

A los doctores Jose Holguin-Veras y Victor Cantillo por sus sabias y valiosas recomendaciones y por darle aval a la investigación en su etapa crítica.

Y finalmente agradecer a todas las personas que de una u otra manera estuvieron ligadas a mi investigación y me acompañaron en todo este maravilloso proceso de formación como Magister en Ingeniería Industrial.

TABLA DE CONTENIDO

| | |
|---|----|
| TABLA DE CONTENIDO | 5 |
| LISTA DE TABLAS | 8 |
| LISTA DE FIGURAS | 9 |
| INTRODUCCIÓN | 11 |
| CAPÍTULO I. GENERALIDADES DEL PROYECTO..... | 14 |
| 1.1 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA | 14 |
| 1.1.1 ANTECEDENTES | 14 |
| 1.1.1 Estudios Sobre Riesgos en la Cadena de Suministro..... | 14 |
| 1.1.2 Estudios Sobre Confiabilidad en Cadenas de Suministro..... | 16 |
| 1.1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA | 18 |
| □ Hipótesis | 19 |
| 1.1.3 JUSTIFICACIÓN | 20 |
| 1.1.4 OBJETIVOS | 22 |
| Objetivo General | 22 |
| Objetivos Específicos..... | 22 |
| 1.1.5 ALCANCES Y LIMITACIONES | 23 |
| 1.2 METODOLOGÍA | 24 |
| 1.2.1 DISEÑO DE LA METODOLOGÍA DE TRABAJO: | 24 |
| 1.2.2 PLANEACIÓN DEL PROYECTO | 25 |
| 1.2.2.1 Descripción de las fases del proyecto | 25 |
| 1.2.2.1.1 Fase de Documentación e Investigación: | 25 |
| 1.2.2.1.2 Fase de Diseño de la Metodología de Trabajo: | 26 |

| | |
|---|----|
| 1.2.2.1.3 Fase de Desarrollo y Evaluación de los Modelos de Optimización: | 26 |
| 1.2.2.1.4 Fase de Evaluación de la Propuesta: | 27 |
| 1.2.2.1.5 Fase de Análisis e Interpretación de Resultados: | 28 |
| CAPÍTULO II. MARCO DE REFERENCIA..... | 29 |
| 2.1 MARCO TEÓRICO | 29 |
| 2.1.1 RIESGOS EN LA CADENA DE SUMINISTRO | 29 |
| 2.1.2 CONFIABILIDAD EN LA CADENA DE SUMINISTRO | 35 |
| 2.2 MARCO CONCEPTUAL | 46 |
| □ Cadena de Suministro | 46 |
| □ Administración de Riesgos en la Cadena de Suministro | 46 |
| □ Optimización | 46 |
| □ Modelo | 47 |
| 2.3 MARCO ESPACIAL | 47 |
| 2.4 MARCO TEMPORAL | 47 |
| CAPÍTULO III. MODELOS DE OPTIMIZACIÓN DE CADENAS DE SUMINISTRO CONFIABLES | 48 |
| 3.1 METODOLOGÍA DE DISEÑO Y GESTIÓN DE CADENAS DE SUMINISTRO CONFIABLES | 48 |
| 3.1.1 MODELOS DE OPTIMIZACIÓN DE CADENAS DE SUMINISTRO CONFIABLES..... | 48 |
| 3.1.1.1 Modelo de Confiabilidad de Flujo Continuo (CFRM)..... | 50 |
| 3.1.1.2 Modelo de Confiabilidad Total de Eslabones (TERM) | 57 |
| 3.1.1.3 Modelo de Confiabilidad Total de la Red de Suministro (TNRM) | 59 |

| | |
|--|----|
| CAPÍTULO IV. VALIDACIÓN DE MODELOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL DISEÑO CADENAS DE SUMINISTRO CONFIABLES..... | 65 |
| 4.1 EVALUACIÓN DE MODELOS DE OPTIMIZACIÓN | 65 |
| 4.1.1 ESCENARIOS DE EVALUACIÓN DE MODELOS DE OPTIMIZACIÓN | 65 |
| 4.1.1.1 Descripción Escenario 1 | 66 |
| 4.1.1.2 Descripción Escenario 2 | 68 |
| 4.1.2 RESULTADOS DE MODELOS DE OPTIMIZACIÓN | 69 |
| CAPÍTULO V. CONCLUSIONES E INVESTIGACIONES FUTURAS | 77 |
| 5.1 CONCLUSIONES DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN | 77 |
| 5.2 FUTURAS INVESTIGACIONES ASOCIADAS AL PROYECTO..... | 79 |
| REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 81 |
| ANEXOS..... | 87 |
| PROGRAMACIÓN EN GAMS DE MODELO CFRM | 87 |
| PROGRAMACIÓN EN GAMS DE MODELO TERM | 90 |

LISTA DE TABLAS

| | |
|--|----|
| TABLA 1: TIPOS DE RIESGO | 30 |
| TABLA 2: TEORÍA DE ACCIDENTES NORMALES Y TEORÍA DE ALTA CONFIABILIDAD | 38 |
| TABLA 3 DESCRIPCIÓN MODELO 1 | 65 |
| TABLA 4 DESCRIPCIÓN MODELO 2 | 65 |
| TABLA 5 DESCRIPCIÓN MODELO 3 | 65 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| ILUSTRACIÓN 1: MAPA EMPRESARIAL DE VULNERABILIDAD, TOMADO DE MCGEE (2008)..... | 15 |
| ILUSTRACIÓN 2: BALANCE DE DAÑOS Y BENEFICIOS OBTENIDOS DE EVENTOS RIESGOSOS. TOMADO DE WATERS (2007)..... | 34 |
| ILUSTRACIÓN 3: TAXONOMÍA DE LA TOMA DE DECISIONES. TOMADO DE SNYDER (2003) | 40 |
| ILUSTRACIÓN 4: DISEÑO DE LA RED DE ABASTECIMIENTO..... | 51 |
| ILUSTRACIÓN 5: FRENTE DE PARETO SOLUCIONES NO DOMINADAS CFRM. MOD 1 – ESC 1. | 69 |
| ILUSTRACIÓN 6: TERM MOD 1 – ESC 1. | 70 |
| ILUSTRACIÓN 7: TNRM MOD 1 – ESC 1. | 70 |
| ILUSTRACIÓN 8: FRENTE DE PARETO SOLUCIONES NO DOMINADAS CFRM. MOD 1 – ESC 2. | 71 |
| ILUSTRACIÓN 9: TERM MOD 1 – ESC 2. | 71 |
| ILUSTRACIÓN 10: TNRM MOD 1 – ESC 2. | 71 |
| ILUSTRACIÓN 11: FRENTE DE PARETO SOLUCIONES NO DOMINADAS CFRM. MOD 2 – ESC 1. | 72 |
| ILUSTRACIÓN 12: TERM MOD 2 – ESC 1. | 72 |
| ILUSTRACIÓN 13: TNRM MOD 2 – ESC 1. | 72 |
| ILUSTRACIÓN 14: FRENTE DE PARETO SOLUCIONES NO DOMINADAS CFRM. MOD 2 – ESC 2. | 73 |
| ILUSTRACIÓN 15: TERM MOD 2 – ESC 2. | 73 |
| ILUSTRACIÓN 16: TNRM MOD 2 – ESC 2. | 73 |
| ILUSTRACIÓN 17: FRENTE DE PARETO SOLUCIONES NO DOMINADAS CFRM. MOD 3 – ESC 1. | 74 |
| ILUSTRACIÓN 18: TERM MOD 3 – ESC 1. | 74 |
| ILUSTRACIÓN 19: TNRM MOD 3 – ESC 1. | 74 |

| | |
|--|----|
| ILUSTRACIÓN 20: FRENTE DE PARETO SOLUCIONES NO DOMINADAS | |
| CFRM. MOD 3 – ESC 2. | 75 |
| ILUSTRACIÓN 21: TERM MOD 3 – ESC 2. | 75 |
| ILUSTRACIÓN 22: TNRM MOD 3 – ESC 2. | 75 |

INTRODUCCIÓN

Con el transcurrir del tiempo se puede notar que el entorno en el cual las empresas se desempeñan se vuelve cada vez más competitivo, en consecuencia, adquirir ventajas con respecto a las demás cadenas de abastecimiento para llegar al consumidor final se ha convertido en una tarea complicada y muy costosa en donde la diferenciación se está reflejando en la investigación y desarrollo de nuevas tecnologías.

La competencia entre estos sistemas no solamente está relacionado con los conceptos de productividad, competitividad y bajo costo, sino también con minimizar el riesgo de pérdida de mercancía y aumentar la confianza entre proveedores y clientes. Para dar respuesta a las dos últimas competencias, recientemente se ha venido desarrollando el concepto de confiabilidad asociado a la capacidad que tienen las cadenas de suministro de trabajar en condiciones normales en cualquier momento.

En esta investigación se consideran tres modelos genéricos y su evaluación en escenarios en los que se analiza una cadena de suministro de cuatro eslabones. En todos los casos se trata de un sistema en donde solo se considera logística directa y no ocurren saltos de eslabones para abastecer producto, es decir el envío de material solo ocurre entre eslabones consecutivos hasta llegar al consumidor final.

La meta de estos modelos al evaluarlos mediante varios escenarios es determinar una metodología para el diseño de cadenas de suministro confiables y de bajo costo de operación. Es decir, se buscará minimizar el gasto incurrido en el sistema por conceptos de apertura de nodos, transporte y almacenamiento de la cadena de suministro estableciendo un patrón de confiabilidad mínima, en donde el sistema se encuentre funcionando correctamente con la menor probabilidad posible de fallas o averías.

Este estudio consta de la realización de tres modelos genéricos de optimización donde se tendrán en cuenta las variables de costo de las operaciones y confiabilidad de los nodos y arcos involucrados en el sistema, y además estará acompañado de la evaluación del desempeño en varios escenarios que ayuden a visualizar el funcionamiento del diseño propuesto y a verificar los resultados obtenidos mediante las hipótesis planteadas antes de la optimización.

Este documento consta de cuatro capítulos, el primero hace referencia a las generalidades del proyecto; se hace una descripción detallada del problema que se está tratando y los objetivos tanto generales como específicos. Además se describen los alcances y las limitaciones del proyecto, la justificación y metodología de trabajo.

El segundo capítulo abarca el estado del arte de la literatura donde se conceptualizan a profundidad tanto la confiabilidad en sistemas de abastecimiento como todos los términos relacionados a este proyecto, además se realiza una breve revisión bibliográfica de los autores con los aportes e investigaciones más importantes acerca de esta, y sus resultados. Por otra parte se hará la descripción detallada de las herramientas metodológicas como el modelamiento matemático, la optimización y las variables independientes involucradas en la aproximación.

El tercer capítulo contiene la descripción, el desarrollo y la implementación de la metodología de diseño, en donde se plantean los modelos de optimización, además se establecen los parámetros de entrada para los diferentes escenarios con el fin de obtener datos para la realización de comparaciones entre las herramientas de optimización del modelo de confiabilidad y las hipótesis planteadas para la solución del problema.

El cuarto y último capítulo es en donde se lleva a cabo el análisis de los resultados. Para esto se diseñó una prueba piloto y con base en los resultados se evalúan diversos factores tales como costos, confiabilidad y rendimiento para

cada caso. Este capítulo supone el soporte para las conclusiones finales donde se demuestra lo plasmado en la hipótesis de esta investigación acerca de la implementación del concepto de confiabilidad en el diseño de cadenas de suministro.

CAPÍTULO I. GENERALIDADES DEL PROYECTO

1.1 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

1.1.1 ANTECEDENTES

Los antecedentes logran una aproximación al problema tratado en esta investigación y los medios utilizados para resolverlo. Por esta razón es de suma importancia mencionar los riesgos en los sistemas de abastecimiento, ya que su probabilidad de ocurrencia es mutuamente excluyente y colectivamente exhaustiva con la confiabilidad de la cadena de suministro.

1.1.1 Estudios Sobre Riesgos en la Cadena de Suministro

El diccionario de la Real Academia de la Lengua define la palabra Riesgo como la contingencia o proximidad de un daño. Este adquiere una importancia considerable en las cadenas de suministro por la capacidad que tenemos de medir tanto la probabilidad de ocurrencia de un daño como la magnitud del mismo.

Weber & Milliman (1997) definen por primera vez el riesgo de forma cuantitativa, estableciendo la siguiente ecuación:

$$R = P \times I$$

Donde P es la probabilidad de ocurrencia de I , y este último es un impacto negativo que envuelve pérdidas de algún tipo. Esto promueve la creación del concepto de administración del riesgo, con el que se busca predecir y disminuir la ocurrencia de un evento además de mitigar el impacto negativo de este (Weber & Milliman, 1997).

El problema de investigación tratado en esta propuesta surge a partir de las desventajas de los sistemas de abastecimiento por tener una alta probabilidad de interrupción de actividades debido a los riesgos que la acechan, en donde surge como alternativa principal de utilización la filosofía de administración del riesgo.

Administrar el riesgo en los últimos años se ha convertido en prioridad de las empresas, procurando utilizar diversas herramientas que incluyen disciplinas administrativas como la gestión de bienes y servicios mencionada por Hardy & Roberts (2003), la administración de proyectos introducida por Pich et al. (2002), sistemas de información estudiados por Cerullo & Cerullo (2004) entre otros, todos con el propósito de controlar los diferentes tipos de riesgo que pueden afectar una cadena de suministro y a su vez permanecer siempre en el tercer cuadrante del mapa empresarial de vulnerabilidad (Ver Ilustración 1). Lo que significa permanecer siempre con una frecuencia baja de ocurrencia de eventos negativos y una severidad mínima de las consecuencias causadas por los riesgos posibles.

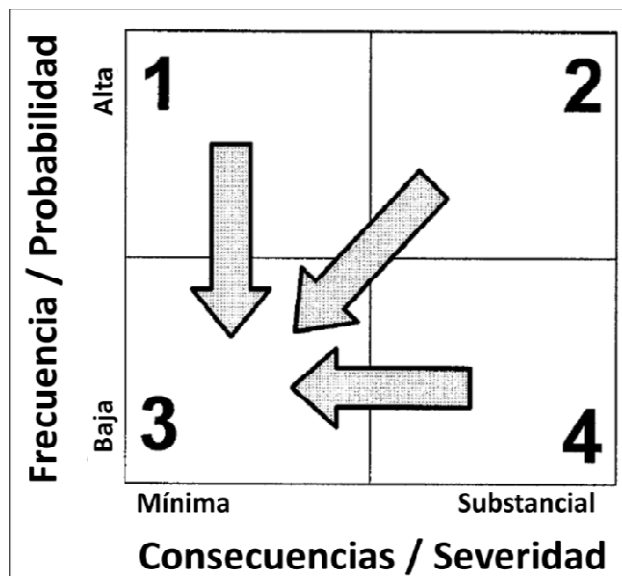


Ilustración 1: Mapa Empresarial de Vulnerabilidad, tomado de McGee (2008)

Junto con la administración del riesgo surge el concepto de ingeniería de confiabilidad, estudiado por diversos autores como Barlow & Proschan (1975), Knight (1991) y Denson (1998), y para efectos de esta investigación será definida como una disciplina científica multidisciplinaria que tiene por objetivo proporcionar un conjunto de métodos formales para investigar los límites de incertidumbre entre la operación del sistema y sus fallas (Cai [1], 1996; Cai [2], 1996).

Dentro de esta disciplina se establece la definición de confiabilidad en las cadenas de suministro tal como lo utilizaremos en esta investigación, por lo cual es importante que mencionemos un breve resumen con los antecedentes que están involucrados en el desarrollo de este concepto.

1.1.2 Estudios Sobre Confiabilidad en Cadenas de Suministro

La confiabilidad en las cadenas de suministro es un tópico relativamente nuevo que está tomando auge gracias a la necesidad de las empresas de diseñar sistemas con una menor probabilidad de falla que conlleva a una mayor satisfacción del cliente final.

Zio (2009) en su trabajo sobre ingeniería de confiabilidad menciona que este concepto fue introducido por primera vez en 1816 y que ha ido evolucionando hasta que a mediados de los años 1950s se transformó en una disciplina científica que estudia la interacción de todos los elementos involucrados en un sistema y la forma en que estos fallan. A partir de esto se empezaron a desarrollar diferentes herramientas para combatir la incertidumbre respecto a las fallas de los sistemas, su mayoría enfocados a modelos genéricos que contemplan interrupciones generales en locaciones.

El problema mayormente relacionado con el desarrollo de esta investigación es la altamente trabajada ubicación de instalaciones. Respecto a representaciones matemáticas del diseño de un sistema de abastecimiento se puede resaltar el

trabajo realizado por Snyder & Daskin (2005) quienes trabajaron en el diseño de cadenas de suministro confiables bajo el supuesto de que se pueden tener locaciones perfectamente confiables y otras que no. Lezhou (2007) diseñó modelos y algoritmos para resolver los problemas de ubicación de nodos y optimización de sistemas confiables utilizando locaciones no confiables para todos los casos complicando la modelación.

En sus trabajos, tanto Snyder & Daskin como Lezhou trabajan solo con la ubicación y la confiabilidad de los nodos o locaciones sin tener en cuenta los posibles fallos que se puedan presentar en la comunicación entre eslabones, limitando el problema.

En nuestro trabajo ampliamos el esquema utilizado pero también involucrando los conceptos de confiabilidad en el traslado de mercancía como elemento independiente de la confiabilidad de los nodos para obtener un modelo genérico mayormente ajustado a la realidad, generando con esto un aporte importante al estado del arte.

1.1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Lawrence Snyder (2003) en su disertación doctoral menciona que el concepto de confiabilidad en cadenas de suministros no había sido mencionado antes de su investigación, desde entonces han surgido pocos modelos matemáticos para el diseño de sistemas confiables de abastecimiento, entre los que se destacan Snyder (2003), Snyder & Daskin (2005) y Lezhou (2007).

Teniendo conocimiento de la existencia de falencias en las cadenas de suministro se aborda como problema principal la falta de una metodología estructurada y herramientas integrales cuantitativas que permitan la optimización de los costos en las que un sistema de abastecimiento incurre por concepto de su operación y que a su vez le permita maniobrar bajo unas especificaciones de confiabilidad alta en donde se maximicen las probabilidades del sistema de permanecer funcionando correctamente.

La modelación propuesta para el diseño de cadenas de suministro confiables involucrará la utilización de programación entera mixta y algoritmos multiobjetivo para la solución del problema de optimización de los escenarios planteados, que ayudarán a resolver los siguientes interrogantes:

- ¿Es posible establecer una metodología para el diseño y gestión de cadenas de abastecimiento confiables que minimicen los costos de operación?
- ¿Es posible plasmar en un modelo matemático de optimización la relación que existe entre los costos de operaciones de una cadena de abastecimiento y su confiabilidad?

Para la solución a estas preguntas se plantea la hipótesis que se demostrará en esta investigación, la cual consiste en:

- **Hipótesis**

El uso de la modelación y posterior optimización de sistemas de abastecimiento aplicando los conceptos de confiabilidad, permite el diseño y la gestión de cadenas de suministro con baja probabilidad de falla y respondiendo por el flujo continuo de materiales.

Para lograr comprobar la hipótesis se implementará la comparación de diferentes escenarios con datos obtenidos de manera aleatoria y se utilizarán software predeterminados para la optimización. Si se llega a comprobar la hipótesis, se afirmará que la implementación de la herramienta genérica basada en el diseño y gestión de cadenas de suministro confiables ubicadas en Colombia puede arrojar buenos resultados, tanto en costos como en minimización del riesgo de falla en el sistema.

Se pueden encontrar en la literatura múltiples modelos matemáticos de minimización de costos de operación de cadenas de suministros que consideran la confiabilidad del sistema como los propuestos por Snyder et al. (2005), Snyder & Daskin (2005), Tang (2006), Berman et al. (2007) y Lezhou (2007). Todos los autores mencionados trabajaron sobre el problema con modelos basados en la confiabilidad de los nodos el cual será uno de los ingredientes de nuestra propuesta, pero su modelo genérico no incluye la confiabilidad de los arcos.

Cabe resaltar que dentro de la literatura no se han encontrado trabajos relacionados con la confiabilidad del transporte de mercancía o comunicación entre eslabones dentro de los modelos de diseño y gestión de cadenas de suministro por lo que esperamos que este sea un aporte valioso a las investigaciones relacionadas con la ingeniería de confiabilidad.

1.1.3 JUSTIFICACIÓN

El problema planteado en esta investigación es de mucha importancia puesto que está demostrado que la confiabilidad en las cadenas de suministro es vital para la excelencia en el servicio al cliente y es el foco que le están dando los jefes de operaciones a la dirección de sus negocios en la actualidad.

Por otra parte, teniendo en cuenta el ámbito práctico del problema científico presentado, se han desarrollado trabajos donde se ha mostrado que las cadenas de suministro pierden competitividad y posicionamiento en el mercado, debido a que con su diseño, planeación y gestión, no son lo suficientemente capaces de responder y anticiparse ante perturbaciones e interrupciones que puedan generar una falla en sus sistemas de suministro (Sheffi et al., 2003).

En el ámbito de la investigación se ilustran una serie de casos en los que grandes empresas mundiales (Nokia, Toyota, Intel, etc.) experimentan grandes pérdidas económicas al no estar preparadas para enfrentar accidentes, sabotajes y desastres naturales que ocasionen una interrupción en las actividades de la empresa, perjudicando las relaciones con los clientes. En el contexto nacional la situación no resulta diferente, se observa con frecuencia paros y/o protestas de diferentes sectores (transporte, educación, etc.), cierres de carreteras, inundaciones, atentados terroristas, y en general una gran cantidad de hechos que en conjunto afectan la competitividad y sostenibilidad de las cadenas de suministros locales y nacionales. Estos problemas presentados en nuestro país hacen que sea una necesidad el diseño y planificación de cadenas de suministro confiables y resilientes, dado que por las condiciones culturales, sociales y económicas de nuestro país las probabilidades de fallas en el flujo normal en las cadenas de suministro son muy altas; esto hace que esta propuesta tenga un alto componente de innovación en el campo de diseño de redes de suministro a nivel nacional y global.

Adicionalmente, la configuración de una cadena de suministro real es muy compleja, dado el gran número de eslabones que se tienen, y a la gran cantidad de sistemas de interconexiones existentes entre éstos, que hacen referencia a sistemas que llevan electricidad, agua, internet, productos físicos y entre otros. Cada eslabón y sus interconexiones tienen una probabilidad y modos de falla asociados que hacen que la probabilidad de que ocurra una falla sea lo suficientemente alta como para ser consideradas en la planeación y diseño de la cadena de suministro, por lo que finalmente se justifica la consideración de un modelo genérico con confiabilidades de nodos y arcos independientes para facilitar el desarrollo del mismo.

1.1.4 OBJETIVOS

Objetivo General:

- Desarrollar modelos matemáticos de optimización para el diseño de cadenas de suministro confiables con el fin de establecer condiciones óptimas de confiabilidad del sistema y costos de operación incurridos.

Objetivos Específicos:

- Plantear modelos matemáticos que determinen y relacionen las variables y parámetros claves en la operación de una cadena de suministro con el fin de evaluar el rendimiento del sistema mediante la optimización de los costos de operaciones y la confiabilidad del sistema.
- Diseñar escenarios que involucren tanto la confiabilidad de los nodos de un eslabón de la cadena de suministro como la confiabilidad basada en el flujo entre eslabones.
- Evaluar los escenarios planteados para los modelos de optimización que permitan la valoración del modelo de diseño y gestión de cadenas de suministro confiables cuantitativamente.

1.1.5 ALCANCES Y LIMITACIONES

Este proyecto de investigación está basado en un modelo de optimización en donde se tienen en cuenta dos factores fundamentales como lo son la confiabilidad y los costos asociados a las operaciones de una cadena de suministro, por lo que no se pretenderá optimizar otros objetivos importantes como niveles de servicio, inversión en tecnología, entre otros, aunque varios de estos se tendrán en cuenta para diferentes supuestos.

Se pretende la realización de un modelo genérico, que sea adaptable a modelos empresariales vigentes, por lo que se verá limitado el uso de variables y se recurrirá a determinados supuestos que se explicarán en el transcurso del documento para mantener vigente la propuesta.

Para evaluar el rendimiento de la propuesta se evaluarán diferentes escenarios con datos creados de manera aleatoria, emulando una cadena de suministro real donde se considera viable la realización de proyectos de estas características, pero se cuenta con restricciones en la confiabilidad de los datos ya que en determinadas ocasiones distribuciones probabilísticas no se ajustan a una realidad específica. Estas últimas se utilizan para determinar los parámetros de entrada de los modelos.

1.2 METODOLOGÍA

La metodología hace referencia a los procesos investigativos que se siguen para alcanzar los objetivos planteados. A continuación se encuentra en detalle la descripción de la metodología utilizada, desde la construcción del plan de acción hasta la fase de obtención y análisis de los resultados, para la realización del proyecto y el cumplimiento de los objetivos.

1.2.1 DISEÑO DE LA METODOLOGÍA DE TRABAJO:

El diseño de la metodología de trabajo está compuesto de cuatro puntos clave, definición del tipo de estudio, método de investigación utilizado, fuentes y técnicas consultadas y/o a aplicar y por último el tratamiento que se le da a la información.

El tipo de estudio es el aspecto de la metodología que permite señalar el nivel de profundización del proyecto de investigación. La investigación corresponde a la creación de una herramienta que sirva de soporte para la toma de decisiones en el diseño y la gestión de una cadena de suministro confiable, tema que ha sido abordado antes, pero no ha combinado los conocimientos resultantes de diferentes metodologías como la simulación, optimización y la confiabilidad de arcos.

Debido a que el área de cadenas de suministro ha sido poco abarcada en la literatura desde el punto de vista de la confiabilidad, la investigación a desarrollarse es de tipo exploratoria, teniendo en cuenta que las características de este proyecto es la realización de un modelo matemático, y además por el tipo de formulación del problema, planteamiento de la hipótesis y determinación de escenarios que la soportan.

En este proyecto de investigación se identifican dos problemas fundamentales, los altos costos variables de las operaciones y la alta probabilidad de interrupciones o fallas en la cadena de suministro. La observación de estos fenómenos y la

búsqueda de oportunidades de mejora indican que el método de investigación al que hace referencia este documento es el método inductivo.

Para la realización de este proyecto de investigación se utilizarán fuentes de información aprobadas internacionalmente como lo son artículos de investigación y tesis doctorales alusivas a los temas tratados. La información involucrada en esta investigación es en su mayoría cuantitativa, debido a que los análisis para determinar las oportunidades de mejora se efectuarán sobre los costos del sistema y la confiabilidad del sistema dada como la probabilidad de que esté funcionando correctamente en un momento determinado. Por esta razón la información que se considera relevante para el análisis se presentará de manera tabulada.

1.2.2 PLANEACIÓN DEL PROYECTO

En la planeación del proyecto se estipulan las fases del mismo, y las tareas involucradas en cada una de ellas, las cuales se ejecutan para alcanzar los objetivos. Estas tareas son presentadas a continuación en orden cronológico:

1.2.2.1 Descripción de las fases del proyecto

El proyecto está destinado a realizarse en seis etapas, la fase de documentación e investigación, fase de diseño de la metodología, fase de desarrollo y validación del modelo de optimización, fase de evaluación de la propuesta, fase de análisis e interpretación de resultados y la fase de análisis de los procesos de mejora.

1.2.2.1.1 Fase de Documentación e Investigación:

Esta etapa corresponde al lapso de tiempo destinado a la revisión bibliográfica existente que abarca los temas relacionados a esta investigación como lo son los modos de falla en cadenas de suministro, la

simulación de eventos discretos sobre sistemas logísticos y la optimización de programación de operaciones bajo un enfoque reactivo.

1.2.2.1.2 Fase de Diseño de la Metodología de Trabajo:

La metodología se basa en el desarrollo y perfeccionamiento del modelo de optimización, donde se concentraron todos los esfuerzos en fabricar una herramienta genérica y viable para el uso de las cadenas de suministro. En esta fase se encuentra la validación de la propuesta bajo diferentes escenarios en donde obtendremos los datos para comparar, de acuerdo a la hipótesis planteada, el rendimiento del modelo de confiabilidad del sistema.

Entre las herramientas de trabajo se encuentran el software de optimización GAMS, y el software para el desarrollo de herramientas computacionales Visual Basic para MS Excel, además de los instrumentos necesarios para la recolección de información como bases de datos especializadas en investigación de operaciones, bibliotecas virtuales, entre otros.

1.2.2.1.3 Fase de Desarrollo y Evaluación de los Modelos de Optimización:

Durante esta fase se desarrollarán modelos de optimización, en los cuales se definirá un sistema de abastecimiento basado en esquemas tradicionales y se buscará su transformación implementando estrategias basadas en minimización de costos e ingeniería de confiabilidad.

El procedimiento a describir se encuentra incluido en las tres actividades principales de esta fase:

- Diseño preliminar del modelo de optimización (Determinación de variables dependientes e independientes, parámetros y supuestos del modelo).
- Modificación continua del modelo (Ajustes y consideraciones del modelo).
- Estabilización y desempeño del modelo (Aplicabilidad del modelo a diferentes instancias).

1.2.2.1.4 Fase de Evaluación de la Propuesta:

Una vez el modelo original sea construido, este se evaluará mediante optimización utilizando la herramienta GAMS y luego adaptando los resultados simulando diversos escenarios, con el fin de determinar el rendimiento de la propuesta basada en confiabilidad.

Esta fase hace referencia al periodo durante el cual se realizaron las tareas de recolección y organización de los datos del sistema de abastecimiento. Se destacan las siguientes actividades principales.

- Establecer variables de respuesta, variables independientes y parámetros del modelo de diseño de cadenas de suministro.
- Establecer ecuaciones de confiabilidad para la separación de los modelos de diseño de cadenas de suministro.
- Establecer parámetros de entrada para los diferentes escenarios.
- Evaluación del modelo de confiabilidad mediante la optimización utilizando una herramienta informática.

- Evaluar y validar las instancias respecto a los datos optimizados para corroborar la información.

1.2.2.1.5 Fase de Análisis e Interpretación de Resultados:

En esta fase se compararán los resultados obtenidos en cada uno de los escenarios propuestos en donde se espera obtener un balance positivo acerca de la minimización de los costos de las operaciones de la cadena de suministro garantizando altos estándares de confiabilidad en el sistema.

CAPÍTULO II. MARCO DE REFERENCIA

2.1 MARCO TEÓRICO

El marco teórico de esta investigación está dividido según las áreas del conocimiento que se consideren de relevancia significativa para el entendimiento del proyecto. Entre dichas áreas se encuentran los riesgos en las cadenas de suministro, la ingeniería de confiabilidad y la optimización en el diseño y gestión de cadenas de suministro confiables.

2.1.1 RIESGOS EN LA CADENA DE SUMINISTRO

El riesgo hace referencia a la probabilidad o frecuencia de que un evento ocurra (de características positivas o negativas) y la magnitud del impacto que dicho evento debe presentar (Weber & Milliman, 1997; Jia et al., 1999; Pich et al., 2002). Para efectos de nuestra investigación solo tendremos en cuenta impactos con características negativas que suponen interrupciones en el correcto flujo de material a través de un sistema de abastecimiento.

Weber & Milliman (1997) agregan a la definición de riesgo en las cadenas de suministro, y de riesgo en general, la habilidad de ejercer cierto control sobre la posibilidad de que ocurra un evento negativo y sobre su magnitud de impacto, concepto importante dado que da el inicio a la búsqueda de alternativas por parte de las cadenas de suministro para controlar los riesgos y mejorar el rendimiento del sistema y la funcionalidad del negocio.

Dado su aporte, se les puede atribuir la creación del concepto de administración del riesgo, el cual, como se mencionaba en el primer capítulo, busca predecir y

disminuir la ocurrencia de un evento además de mitigar el impacto negativo de este (Weber & Milliman, 1997).

La importancia que ha tomado la administración del riesgo en la cadena de suministro en los últimos años se debe a que las mismas empresas han adecuado sus sistemas para tener una alta probabilidad de falla, Sheffi (2005) explica que los mejores esfuerzos de las empresas para construir cadenas de suministro más eficientes, y la competencia en la que han entrado estas por la reducción de costos ha desatado como consecuencia no intencional el incremento del riesgo de que una ruptura en el sistema ocurra y posiblemente la expansión en la magnitud de su impacto. Como consecuencia, mientras las empresas continúen mejorando sus procesos productivos en eficiencia y reducción de costos, muchos menos recursos estarán disponibles para combatir los riesgos del sistema de abastecimiento (McGee, 2008).

Donald Waters (2007) define básicamente dos tipos de riesgo que se pueden presentar en las cadenas de suministro que se definen en la siguiente tabla:

Tabla 1: Tipos de Riesgo

| Tipo de Riesgo | Características | Acción A Tomar | Ejemplos |
|-----------------------|---------------------------|---|--|
| Interno | Controlables, predecibles | Diseñar estrategias para reducir efectos | Entregas tardías, exceso de inventario, pronósticos desacertados, errores humanos entre otros. |
| Externo | No se pueden controlar | Utilizar herramientas existentes para administrar riesgos y mitigar impacto | Terremotos, huracanes, ataques terroristas, guerras crímenes, entre otros. |

Para efectos de esta investigación solo tendremos en cuenta los riesgos de carácter interno, debido a que se pueden predecir con mayor facilidad y se encuentran por dentro del rango de control de los administradores de la cadena de suministro, por lo que podemos asumir probabilidades independientes para los

entes del sistema de abastecimiento de permanecer funcionando correctamente en un momento determinado. En contraste los riesgos externos son difíciles de predecir y no se pueden controlar, solamente administrar herramientas y recursos para mitigar su impacto y procurar que la cadena de suministro siga funcionando dado una eventualidad, por ejemplo no se puede asumir que a un territorio donde funciona un sistema lo afecta un terremoto con una probabilidad del 10% en un momento determinado.

Entre los autores que han hecho aportes importantes al desarrollo del concepto de riesgos en las cadenas de suministro se destacan Fisher et al. (1994) quienes mencionan que con una alta variedad de productos y alta incertidumbre de la demanda es clave encontrar y usar métodos para mejorar la confiabilidad de la operación en respuesta al riesgo. Lee et al. (1997) de igual manera se refirió a la incertidumbre y variabilidad de la demanda como un posible causal de eventos que afectan el correcto funcionamiento de una cadena de suministro, introduciendo el concepto de efecto látigo (Bullwhip Effect).

Chapman et al. (2002) por primera vez da unas directrices específicas de cómo se debe administrar el riesgo en una cadena de suministro promoviendo cuatro simples pasos, identificación, valoración, administración de la continuidad y coordinación de actividades bajo riesgo de ruptura y aprendizaje de las experiencias para completar el ciclo de mejora continua. El concepto nuevo es la valoración del riesgo, este consiste en un examen cuidadoso de lo que, en el trabajo, podría causar daño a los que laboran diariamente. Los trabajadores y otras personas tienen derecho a ser protegidos contra daños causados por una falta, y se requiere tomar medidas de control para ello.

Las directrices de la organización están legalmente obligadas a evaluar los riesgos en su lugar de trabajo para que en el debido caso poner en marcha un plan para controlar estos. Por priorización es posible poner en práctica medidas para reducir la probabilidad de ocurrencia o mitigar el impacto de estas

amenazas. Además se pueden identificar las concentraciones inaceptables de riesgo y modos de falla (Sheffi et al., 2003). A esto se le conoce como administración de riesgos.

La administración de riesgos en la cadena de suministro se hizo posible gracias a la cuantificación del riesgo. Los investigadores Weber & Milliman (1997) definieron por primera vez el riesgo de forma cuantitativa, $R = P \times I$, donde P es la probabilidad de ocurrencia de I , y este último es un impacto negativo que envuelve pérdidas de algún tipo. Waters (2007) en su obra determina a raíz de observaciones la probabilidad de que ocurra un evento I , estableciendo la siguiente ecuación:

$$\text{Probabilidad de un evento} = \frac{\text{Número de veces que el evento ocurre}}{\text{Número de observaciones}}$$

Para efectos de nuestra investigación, esta será la manera para determinar la probabilidad de ocurrencia de una falla en el sistema para trabajarla de forma independiente.

Desde que se está trabajando en el desarrollo de herramientas para la administración del riesgo sin duda el recurso más utilizado es el de tecnologías de información. Marcus & Nichols (1999) mencionan que la inversión en tecnologías de información le pueden permitir a las cadenas de suministro administrar las formas de cómo poner atención a los diferentes riesgos que la acechan y solucionar los problemas.

Edward (2006) en su disertación propone una metodología para examinar como la inversión en tecnologías de información ayuda a mejorar el rendimiento seguro o sin interrupciones, resolviendo cuatro interrogantes principales, primero establecer una conexión entre inversión en tecnologías de información y el rendimiento seguro de la cadena de suministro, el segundo identificar la tecnología de información específica a utilizar para un determinado sistema de abastecimiento,

el tercero establecer tecnologías seguras para el manejo de la información y por último determinar un patrón de relación entre tecnologías seguras de información y rendimiento seguro.

La inversión en nuevas tecnologías como otras herramientas que ayudan a identificar, predecir y administrar riesgos son solo un soporte para la toma de decisiones, las cuales no necesariamente tienen que ir enfocadas a minimizar riesgos. Knight & Petty (2001) en sus estudios sobre administración de riesgos en la cadena de suministro mencionan que no necesariamente hay que buscar en todos los casos reducir los riesgos y mitigar el impacto, sino también hacer referencia en las oportunidades de beneficios que se pueden obtener a través de los riesgos incurridos. Un enfoque parecido se puede percibir de Waters (2007) quien sugiere tomar una perspectiva balanceada para controlar los riesgos, a la que se pueden presentar con determinada probabilidad riesgos con características destructivas y eventos de donde se pueden extraer beneficios (Ver ilustración 2).

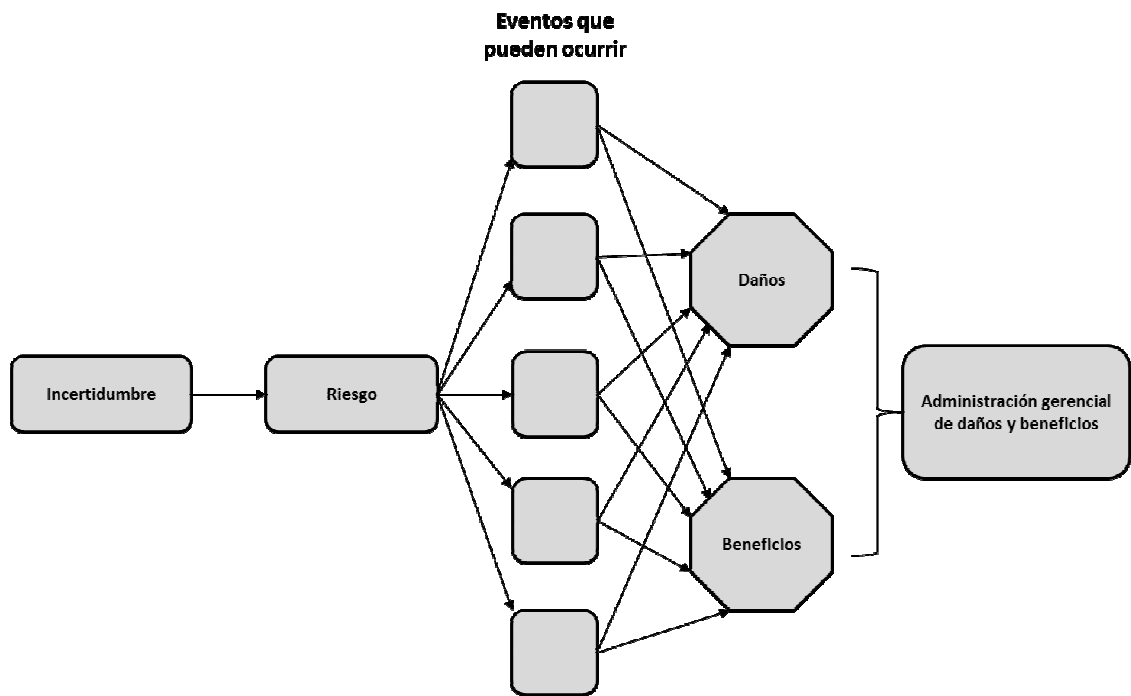


Ilustración 2: Balance de daños y beneficios obtenidos de eventos riesgosos. Tomado de Waters (2007).

Por otra parte, gran aporte de esta investigación se basa en poder crear cadenas de suministros confiables no solamente en sus eslabones sino también en las conexiones existentes entre ellos, por lo que es muy importante resaltar los estudios realizados acerca de los riesgos que se puedan presentar en el flujo de material en tránsito dentro de un sistema de abastecimiento.

Uno de los problemas que se puede presentar es la interrupción entre las relaciones existentes entre los entes de una cadena de suministro, en donde la falta de comunicación se convierte en un riesgo para el flujo natural del producto. Cachon (2003) diseñó una estrategia para minimizar el riesgo ocasionado por este problema mediante la implementación de módulos de descuento en los contratos entre proveedores y clientes. Narayanan & Raman (2004) tomaron la propuesta de Cachon y la modificaron para no trabajar con descuentos sino con incentivos alineados a la compra de productos y Reichheld & Schefter (2000)

defendieron su lealtad al comercio electrónico y su facilidad para las comunicaciones.

Crone (2006) estudió principalmente las causas logísticas, donde se destaca el transporte, por las cuales existen interrupciones en las cadenas de suministro, aportando dos soluciones cualitativas para el problema, en las que propone reducir el contenido de transporte para de esta manera reducir la longitud acumulada en un recorrido de la cadena de suministro y usar de manera más eficiente el transporte, consolidando cargamentos para una zona específica y utilizando terceros como proveedores. Hauser (2003) trabajó sobre el mismo problema pero desarrollando un modelo financiero para obtener una solución cuantitativa a este problema.

En la literatura no se encuentran otros modelos cuantitativos para la solución de este problema, por lo que confiamos en que la alternativa propuesta consiga suplir la necesidad de integrar los diferentes riesgos internos que se pueden presentar en una cadena de suministro tanto en los eslabones como en sus interacciones plasmados en un modelo cuantitativo de optimización.

2.1.2 CONFIABILIDAD EN LA CADENA DE SUMINISTRO

Según el diccionario de la real academia de la lengua española, confiabilidad se define como la probabilidad de un buen funcionamiento de algo. Este concepto aplicado a las cadenas de suministro hace referencia a maximizar la probabilidad de que la red de abastecimiento permanezca conectada después de una falla o interrupción de alguno de los nodos o arcos del sistema (Colbourn, 1987).

Investigadores como Colbourn (1987), Shier (1991) y Shooman (2002) tomaron prestado el concepto de confiabilidad en las cadenas de suministro de la teoría de confiabilidad en redes de telecomunicaciones, que está relacionada con

computarizar, estimar y maximizar la probabilidad de que una red permanezca conectada a pesar de fallas aleatorias para definirlo como la probabilidad de que la cadena de suministro se encuentre funcionando correctamente.

Las cadenas de suministros están sujetas a fallas aleatorias que pueden ser consecuencias de interrupciones, bloqueos o congestiones (Snyder & Daskin, 2005), Snyder & Daskin (2005) mencionan que la mayoría de las investigaciones acerca de confiabilidad de redes van direccionadas a la probabilidad de que los arcos que conectan los nodos en una red permanezcan funcionando pero autores como Eiselt et al. (1996) trabajaron también en la confiabilidad de dichos nodos completando los estudios.

Al empezarse a trabajar con cadenas de suministro el foco de atención de los investigadores tomó otro rumbo dado que por la literatura que se presenta, el principal problema en el diseño y gestión de un sistema de abastecimiento es el de la ubicación de instalaciones, por lo que los nodos empezaron a presentar mayor participación en el desarrollo de los modelos de confiabilidad. La principal razón para que esto ocurriera es que los modelos de confiabilidad en redes de telecomunicaciones raramente se preocupan por los costos y tienen mayoritariamente una consideración por la conectividad de los nodos, el cual se ve contrarrestado en los modelos de confiabilidad en cadenas de suministro (Snyder & Daskin, 2005).

Desarrollando el concepto de confiabilidad en las cadenas de suministro a través de los años, se han definido dos teorías muy importantes que proveen un examen de las interrupciones en los sistemas de abastecimiento y los factores involucrados en su ocurrencia, estas son la Teoría de Accidentes Normales y la Teoría de Alta Confiabilidad (NAT y HRT respectivamente por sus siglas en inglés) (Speier et al., 2011). La Teoría de Accidentes Normales fue desarrollada durante un examen exhaustivo de un desastre en una planta nuclear ubicada en la isla Three Mile, descrita en los trabajos de Perrow (1984,1999) en donde

sugiere que los accidentes son inevitables, en consecuencia normales, cuando existe acoplamiento hermético e interacciones complejas entre de los entes de un sistema.

El acoplamiento hermético se presenta cuando los componentes de una cadena de suministro son altamente interdependientes, incrementando el potencial para la ocurrencia de un incidente, mientras que el tiempo disponible para la recuperación de las consecuencias acarreadas por la falla disminuye. Esto porque la interdependencia de sus entes desata una reacción en cadena al momento de una falla (Perrow, 1994; Rijpma, 2003).

De igual manera las interacciones complejas se presentan en las cadenas de suministro cuando sus procesos subyacentes presentan eventos inesperados no visibles con claridad causando impactos que no pueden ser comprendidos en su totalidad (Perrow, 1994). Esta interacción entre procesos y eventos inesperados puede dificultar el acceso a información acerca de productos y procesos, causando consecuencias no deseadas para el desarrollo de actividades de procesos individuales y de un sistema completo (Perrow, 1994).

La Teoría de Alta Confiabilidad se enfoca en los procesos que una cadena de suministro puede implementar para asegurar una confiabilidad organizacional continua y reducir, hasta incluso eliminar la probabilidad de ocurrencia de accidentes (Roberts, 1990a, 1990b). Weick & Roberts (1993) mencionan que esta teoría se aplica prioritariamente a las organizaciones que realizan un mayor énfasis en la confiabilidad del sistema sobre su eficiencia, como por ejemplo planta nucleares, de gas, compañías eléctricas, etc.

Es importante mencionar que tanto la Teoría de Accidentes Normales como la Teoría de Alta Confiabilidad no se enfocan en comportamientos y decisiones individuales, pero si en los sistemas, estructuras organizacionales y los vínculos que los unen. A continuación se presenta una tabla comparativa de ambas perspectivas, tomando la Teoría de Alta Confiabilidad como el precursor de los

modelos desarrollados de diseño y gestión de cadenas de suministro considerando la minimización de la probabilidad de que el sistema sufra una interrupción en su flujo continuo en determinado momento (Ver Tabla 2).

Tabla 2: Teoría de Accidentes Normales y Teoría de Alta Confiabilidad

| | Teoría de Accidentes Normales | Teoría de Alta Confiabilidad |
|---------------------------------------|---|---|
| Premisa General | Accidentes son normales y pasarán a pesar de las medidas que se puedan tomar para minimizar su ocurrencia (Perrow, 1984). | Los accidentes se pueden prevenir (Roberts, 1990a, 1990b). |
| Marco Conceptual | Teoría en la causalidad de tipos específicos de accidentes (Rijpma, 1997) | Identifica estrategias organizacionales para reducir problemas potenciales y promover la confiabilidad organizacional (Weick, 1987) |
| Naturaleza de la Investigación | La industria e incidentes específicos con énfasis en la reestructuración de entornos de alto riesgo | Enfoque en prácticas organizacionales y cultura que promueva confiabilidad |

*Fuente: Tomado de Speier et al. (2011).

Los modelos basados en confiabilidad son relativamente nuevos en la literatura y tienen diferencias considerables respecto a los modelos tradicionales de optimización bajo incertidumbre en los que la meta principal es escoger una solución que tenga buen desempeño basado en supuestos de incertidumbre en condiciones futuras como lo son demandas aleatorias o costos variables. Los modelos de confiabilidad buscan anticiparse a las fallas y procurar que el sistema siga funcionando a pesar de que uno de sus componentes falle (Snyder & Daskin, 2005).

Snyder (2003) en su disertación doctoral expone una diferencia importante entre los modelos de optimización robusta y los de optimización confiable. La primera

hace referencia a la búsqueda de soluciones que presenten buen funcionamiento bajo incertidumbre respecto a futuras condiciones en el sistema, en cambio los modelos de confiabilidad buscan soluciones que funcionen bien aun cuando partes del sistema fallen.

Snyder propone una taxonomía para la toma de decisiones, en donde en el nivel más alto encontramos problemas bajo situaciones de certidumbre y situaciones bajo incertidumbre, los primeros no tienen problema en la toma de decisiones dado que se cuenta con toda la información disponible por lo que se descartan, en cambio los últimos presentan en segundo nivel la opción de modelar de manera robusta u optimizar utilizando modelos de confiabilidad. La optimización de modelos robustos en la clasificación de la toma de decisiones evalúa dos escenarios, uno en donde se calculan los costos esperados de operación y otro en donde se evalúa el peor caso posible dado la incertidumbre que se puede presentar en el futuro, en cambio la optimización confiable evalúa escenarios donde se calcula el costo esperado de operación del sistema si ocurren fallas y de igual manera el costo esperado en el peor caso de fallas posible (Ver Ilustración 3).

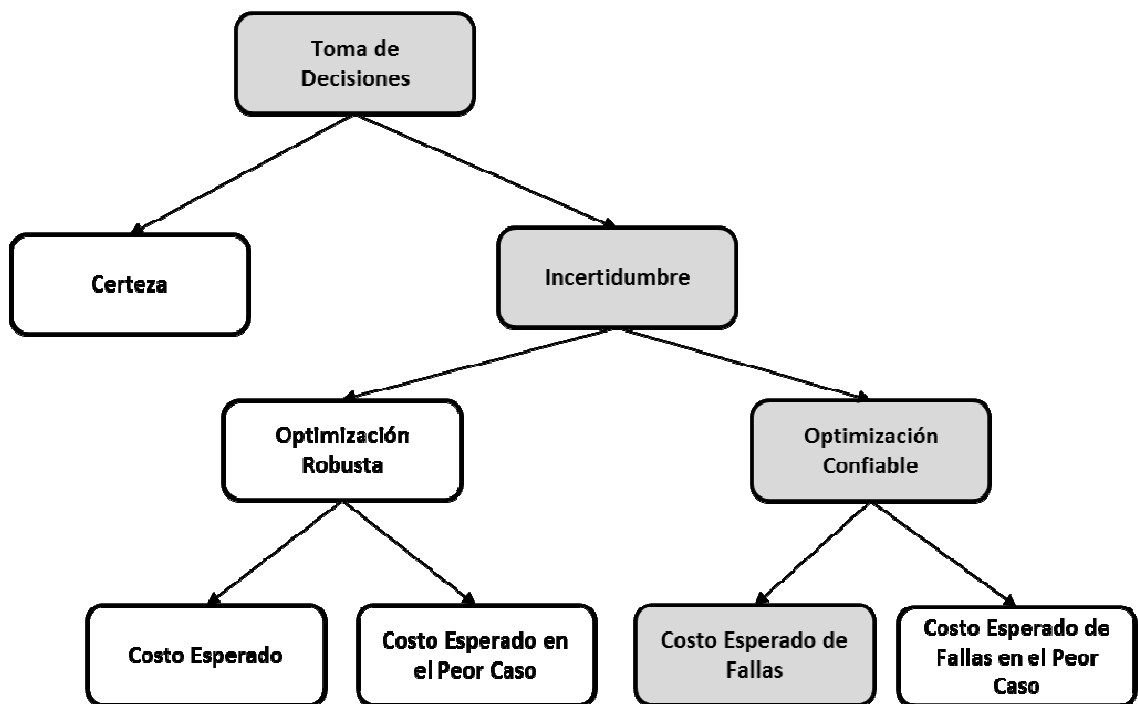


Ilustración 3: Taxonomía de la Toma de Decisiones. Tomado de Snyder (2003)

La línea de la taxonomía de la toma de decisiones propuesta por Snyder (2003) que le dará rumbo a esta investigación es la resaltada, dado que desarrollaremos modelos de costos de operación de cadenas de suministro en búsqueda de que su operación sea confiable.

Entre los múltiples tipos de modelos cuantitativos y cualitativos para la administración de riesgos y la creación de cadenas de suministro confiables, se hace énfasis específico en aquellas aproximaciones cuantitativas que hagan referencia a la solución del problema de ubicación de localidades o nodos de un sistema de abastecimiento, dado que se asemeja mucho al problema tratado en esta investigación.

Debido a las dificultades envueltas en el desarrollo de los modelos de confiabilidad en cadenas de suministro, su optimización en métodos cuantitativos

raramente incluyen expresiones explícitas para indicar la confiabilidad de la red de abastecimiento, por el contrario la mayoría de las veces los modelos buscan la minimización de costos con modelos que exijan características especiales como los expuestos por Monma & Shallcross (1989), Monma et al. (1990), Bienstock et al. (1990), Grötschel et al. (1995) y Fortz & Labbé (2002).

Dentro de los pocos modelos en donde podemos referenciar la utilización de funciones que expresen una maximización de la confiabilidad del sistema encontramos el desarrollado por Snyder & Daskin (2005) quienes plantearon una metodología de optimización basada en el problema P-Mediana que minimiza la suma de los costos ponderados de operación y de los costos ponderados de falla esperada. En su modelo, Snyder y Daskin expresan una maximización de la confiabilidad como una minimización de los costos esperados de operación bajo falla, relacionados en la siguiente ecuación:

$$w = \sum_{i \in I} h_i \left[\sum_{j \in NF} \sum_{r=0}^{P-1} d_{ij} q^r Y_{ijr} + \sum_{j \in F} \sum_{r=0}^{P-1} d_{ij} q^r (1 - q) Y_{ijr} \right]$$

Donde w es el costo esperado operacional del sistema bajo la ocurrencia de fallas, h_i es la demanda de cada uno de los i mercados pertenecientes al conjunto I de mercados. El subíndice j es el de los proveedores cuyo conjunto viene denominado por la unión $NF \cup F$, donde el primero hace referencia al conjunto de proveedores cuya probabilidad de falla es igual a cero. El nivel r es la asignación o prioridad con la que un proveedor j abastece al mercado i . Es un número entre 0 y $P - 1$ donde cero equivale al proveedor prioritario de un mercado en particular y P es el conjunto de proveedores que se seleccionan para su apertura del conjunto $NF \cup F$. El valor de q equivale a la probabilidad de que un proveedor $j \in F$ falle, d_{ij} son los costos de transporte de mercancía desde el proveedor j hasta el mercado i y por último la expresión Y_{ijr} hace referencia a una variable

binaria cuyo valor determina si la demanda del mercado i es asignada o no al proveedor j con prioridad r .

Al minimizar esta ecuación se está reduciendo el costo esperado de operación dado que el sistema puede fallar, pero este modelo presenta diversos supuestos en los cuales hace contraste con nuestra investigación.

En primer lugar Snyder y Daskin asumen que la probabilidad de que un proveedor fallase en su intento por abastecer cualquier mercado es una constante igual a q en el caso que $j \in F$, razón por la cual pueden utilizar la expresión $q^r(1 - q)$ como la probabilidad de que el proveedor pueda abastecer un mercado determinado con prioridad r dado que los r proveedores anteriores fallaron. Nuestro modelo propondrá diferentes probabilidades de falla para todos los nodos involucrados por lo que cambiaría la expresión q^r a una productoria con confiabilidades definidas por subíndices para cada uno de los nodos de la cadena de abastecimiento.

Por último toma como supuesto de que un solo proveedor será el encargado de abastecer toda la demanda de un mercado sin contemplar capacidades, lo que difiere de nuestro modelo que contemplará capacidades y conservación de flujo además de tres eslabones, a diferencia de los dos expresados en el modelo de Snyder y Daskin.

De Castro (2004) en su disertación doctoral, aplica un concepto parecido al plasmado por Snyder y Daskin, solo que en este no se toman como tal eslabones de proveedores y mercados sino que se establece un modelo de una completa red de abastecimiento en donde todos los nodos pueden abastecer a sus similares y el objetivo principal es obtener una ruta óptima esperada para el recorrido de un nodo a través de toda la red dado que cuenta con información fluctuante sobre cual semejante estará disponible para satisfacer su requerimiento y cual no.

Azaron et al. (2008) describieron en un modelo multiobjetivo otra forma de combatir la incertidumbre en cadenas de suministro, desarrollando un escenario con dos eslabones compuestos por proveedores y distribuidores, estableciendo una ecuación para el riesgo financiero como se describe a continuación:

$$Riesgo = \sum_{l=1}^L p_l u_l$$

En su modelo Azaron, Brown, Tarim y Modarres utilizaron esta ecuación como uno de los objetivos del modelo cuya función es minimizarlo, en donde p_l hace referencia a la probabilidad de ocurrencia del escenario l que denota una posibilidad entre un conjunto $L = |T| \times 2^{|S|}$ de escenarios posibles donde T es equivalente a un conjunto de escenarios determinados como parámetros de entrada del modelo que consideran probabilidades dadas de ocurrencia de eventos relacionados con la demanda, costos de procesamiento, costos de transporte, capacidad entre otros.

También asumen que algunos de los proveedores pueden ver limitadas su capacidad de distribuir, por lo que se tiene un número de escenarios para los posibles y equivalentes a $2^{|S \times I|}$ donde S es el conjunto de proveedores, 2 es el número de eslabones e I hace referencia al conjunto de distribuidores el cual para su caso específico lo tomaron con valor uno.

Por último u_l hace referencia a una variable binaria que representa si las condiciones del escenario l evaluado superan en costo a un objetivo de costo total de operación planteado como parámetro de entrada si su valor es uno y cero si no supera dicho costo objetivo.

En este modelo, la confiabilidad que proponen los autores resulta en una suma de probabilidades cuyo objetivo es disminuir su valor. La resultante será el costo mínimo esperado de sostenimiento de operaciones de la cadena de suministro independientemente de los escenarios, dado que el modelo y la ecuación están

diseñados para considerar todos los escenarios con un solo resultado en las cantidades a transportar desde los proveedores al distribuidor.

Esta aproximación se aleja un poco de nuestro objetivo principal dado que nuestro modelo pretende un desarrollo genérico, por lo que no es necesario considerar escenarios como parámetros de entrada, pero se rescata el hecho de la conservación de flujo en el modelo que permite que el distribuidor sea abastecido de varios proveedores al tiempo.

En otra notable investigación, Hsu & Li (2011) definieron una función de confiabilidad en función de las plantas de producción y su capacidad para suplir la demanda:

$$R(\tilde{f}_k^t) = \Pr[\underline{Y}_k \leq Y_k(\tilde{f}_k^t) \leq \bar{Y}_k]$$

En dicha función se evalúa la probabilidad de que la capacidad para cada planta de producción permanezca entre los límites de confiabilidad, estos son los límites de aceptación para la utilización de la capacidad donde el inferior tiene un valor de \underline{Y}_k para todo k que representa una planta de producción determinada, y un límite superior para la utilización de la capacidad dado por la expresión \bar{Y}_k . En este orden, la función $Y_k(\tilde{f}_k^t)$ vendría siendo la utilización de la capacidad instalada de producción en la planta k en función de la variable \tilde{f}_k^t que hace referencia al flujo o cantidad de producción requerida para satisfacer la demanda en un periodo t determinado.

En esta aproximación, los autores evalúan el uso de las plantas de acuerdo a las fluctuaciones de la demanda, y el objetivo principal es determinar cantidades de producción que mitiguen el impacto causado por dichas fluctuaciones dado que se establecen límites de confiabilidad que a su vez dependen de la demanda. Nuestro modelo considera capacidades, pero simplifica el hecho de no evaluar confiabilidad como probabilidad de utilización de la capacidad instalada dentro de

parámetros dados, considerando que dicha confiabilidad se puede evaluar directamente en la función objetivo de minimización de costos.

Como podemos observar, en la literatura se ha plasmado muy poco acerca de modelos matemáticos que contemplen explícitamente expresiones que cuantifican la confiabilidad, y en ninguno de los casos se cuenta con una aproximación que establezca probabilidades de falla independiente para nodos y arcos, el cual es uno de los objetivos de este estudio.

2.2 MARCO CONCEPTUAL

Se presenta a continuación las palabras y conceptos que resultan claves para la realización de esta investigación, y cuya definición es pertinente para el correcto entendimiento de este documento:

- **Cadena de Suministro**

Una cadena de suministro es un sistema complejo en el cual se ven involucrados flujos de material, información y dinero. Está compuesto por diferentes subsistemas representados por empresas que pueden ser proveedores, fabricantes, distribuidores, detallistas y otros, entre las cuales se desarrollan los flujos mencionados anteriormente. Su objetivo principal es la satisfacción del consumidor final al ofrecerle un producto o brindarle un servicio.

- **Administración de Riesgos en la Cadena de Suministro**

La administración de riesgos en la cadena de suministro hace referencia a la utilización de herramientas para predecir, determinar y mitigar los impactos causados por los eventos negativos que se pueden presentar en el sistema de aprovisionamiento.

- **Optimización**

La optimización es una herramienta matemática utilizada para el modelamiento de cualquier tipo de sistemas y obtención de los mejores resultados en sus variables de respuesta. En esta investigación se utilizará la optimización para la cuantificación del diseño y gestión de cadenas de suministro confiables.

- **Modelo**

Para efectos de esta investigación, modelo hará referencia a la representación tanto matemática como sistematizada de la cadena de suministro mediante representación simbólica y usando software computacional. El software utilizado para la realización del modelo es el paquete GAMS.

2.3 MARCO ESPACIAL

Este proyecto involucra cualquier espacio dado de tratarse de un modelo genérico, cuya aplicabilidad involucra diferentes tipos de cadenas de suministro. Por tratarse de una cadena de suministro genérica, los sistemas no tienen ninguna adjudicación a un sector en específico dado que por especificaciones del proyecto de investigación al que está amarrado esta propuesta solo se presentan datos simulados sin ningún caso de estudio determinado.

2.4 MARCO TEMPORAL

Las actividades en este proyecto corresponden a una actualización en el estado del arte de algunos de los procesos involucrados en el diseño de cadenas de suministro, por lo que la información recolectada no debe tener más de cinco años en los temas referentes a confiabilidad en sistemas de abastecimiento.

CAPÍTULO III. MODELOS DE OPTIMIZACIÓN DE CADENAS DE SUMINISTRO CONFIABLES

3.1 METODOLOGÍA DE DISEÑO Y GESTIÓN DE CADENAS DE SUMINISTRO CONFIABLES

El desarrollo de los modelos de confiabilidad para el diseño y gestión óptima de cadenas de suministro corresponde al principal objetivo de esta investigación con la que se busca proponer herramientas metodológicas genéricas y confiables para cualquier sistema de abastecimiento que desee trabajar bajo una probabilidad de funcionamiento deseada.

3.1.1 MODELOS DE OPTIMIZACIÓN DE CADENAS DE SUMINISTRO CONFIABLES

En el desarrollo de esta investigación se trabajará sobre las bases del modelo básico tradicional para el diseño de redes de suministro es el *Problema de Ubicación de Instalaciones con Capacidades Limitadas* (CFLP, por sus siglas en Inglés), en el cual la demanda es fija y conocida puesto que se trabaja como parámetro de entrada. El principal objetivo evaluado en este modelo es la decisión de cuáles son las instalaciones de un conjunto I que se deben habilitar para cumplir con el cien por ciento de la demanda de todos los mercados contenidos en el conjunto J . Estas instalaciones a su vez están en la obligación de respetar las restricciones de capacidad de almacenamiento y flujo de material de sus bodegas internas, factor que le agrega complejidad al problema en contraste con el modelo tradicional del problema de ubicación de instalaciones con capacidad ilimitada que se ve favorecido en esta restricción dado que no la presenta pero a su vez agrandando el número posible de soluciones.

El modelo establece el diseño de una cadena de suministro de dos eslabones y se presenta a continuación:

$$Z_{\min} = \sum_{i \in I} f_i Y_i + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} c_{ij} \times X_{ij} \quad (3.1)$$

S. a:

$$\sum_{i \in I} X_{ij} = D_j \quad \forall j \in J \quad (3.2)$$

$$\sum_{j \in J} X_{ij} \leq \text{Cap}_i \times Y_i \quad \forall i \in I \quad (3.3)$$

$$Y_i \in \{0; 1\} \quad \forall i \in I \quad (3.4)$$

$$X_{ij} \geq 0 \quad \forall i \in I, \forall j \in J \quad (3.5)$$

La ecuación (3.1) es la función objetivo, donde se busca minimizar los costos de operación de la cadena de suministro compuestos por los costos fijos de apertura de una instalación i y los costos de transporte de un número determinado de unidades de producto desde la instalación i hacia el mercado j . La ecuación (3.2) hace referencia a la conservación de flujo donde se determina que el total del número de unidades que lleguen desde el conjunto I a cualquiera de los mercados j corresponde exactamente a la demanda de dicho mercado. La ecuación (3.3) corresponde a la restricción de la capacidad de flujo instalada en cada una de las instalaciones del conjunto I . La ecuación (3.4) es la variable binaria de ubicación de una instalación donde el valor 1 indica que la instalación i se ubica en la red y 0 en caso contrario y por último la ecuación (3.5) hace referencia a la no negatividad de las cantidades a transportar desde las instalaciones hacia los mercados.

Este modelo será la base para el desarrollo de nuestra metodología de investigación donde trabajaremos sobre las mismas ecuaciones de costos inicial con la diferencia

que agregaremos dos eslabones para generalizar el concepto de cadenas de suministro confiables a redes globales.

A continuación se presenta el primero de los tres modelos de confiabilidad a desarrollar:

3.1.1.1 Modelo de Confiabilidad de Flujo Continuo (CFRM)

Como ha sido mencionado en gran parte del desarrollo del proyecto, la confiabilidad de los sistemas de abastecimiento es la capacidad de estas de desempeñar sus tareas básicas de manera correcta bajo circunstancias establecidas (fallas del sistema). Esta capacidad afecta directamente los costos de funcionamiento del sistema por lo que se ha planteado un modelo de programación mixta no lineal para relacionar estas variables.

El modelo propuesto considera una cadena de suministro con un conjunto de proveedores, distribuidores, minoristas y mercados relacionados (Ver Ilustración 4), a partir de este supuesto, y para el desarrollo de todos los modelos involucrados en esta investigación se tendrá en cuenta este diseño de red de abastecimiento, cuyas características principales destacan que cada uno de los nodos de un eslabón está en la capacidad de suministrar material o producto a cualquiera de los nodos del eslabón siguiente.

Por simplicidad, no se considerará para ninguno de los modelos la utilización de logística inversa (devoluciones) ni saltos de eslabones (de los proveedores abastecer directamente a minoristas y mercados) para el envío de material.

Ninguno de los modelos estará ligado a la utilización de variables de tiempo, por lo que las probabilidades supuestas de falla en consideración de los modelos para los nodos y arcos serán constantes e independientes.

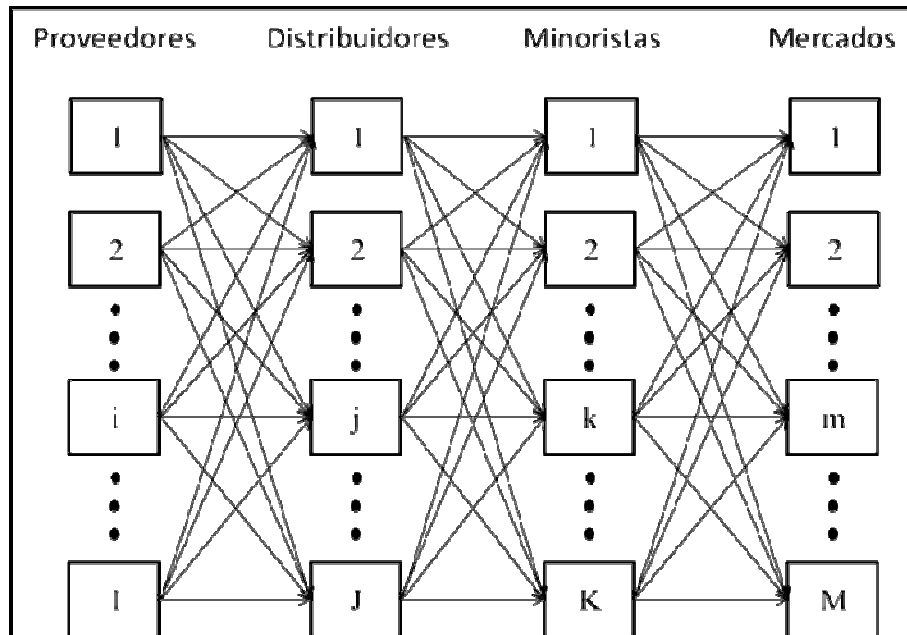


Ilustración 4: Diseño de la Red de Abastecimiento

Cabe resaltar que el modelo CFRM (por las siglas en inglés de Modelo de Confiabilidad de Flujo Continuo) solo considera la confiabilidad de los nodos involucrados en el diseño y gestión de la cadena de suministro y su principal objetivo es determinar un sistema de abastecimiento cuya operación se ejecute a costo óptimo bajo un parámetro de confiabilidad deseado. La confiabilidad de los arcos la manejaremos en el tercer modelo propuesto y se propondrán bases para futuras investigaciones.

Este modelo de confiabilidad asegura que a pesar de las fallas, por lo menos existirá un conjunto de nodos pertenecientes a todos los eslabones entre proveedores, distribuidores y minoristas donde se conservará el flujo continuo del material hasta llegar al minorista, es decir que con una confiabilidad deseada y establecida como parámetro de entrada, el sistema por lo menos tendrá un canal de abastecimiento disponible y funcionando de buena manera para llegar al mercado.

A continuación la notación utilizada para el desarrollo del CFRM:

Índices a usar:

$i \in I$: Donde I es el conjunto de Proveedores.

$j \in J$: Donde J es el conjunto de Distribuidores.

$k \in K$: Donde K es el conjunto de Minoristas.

$m \in M$: Donde M es el conjunto de Mercados.

Parámetros de Entrada:

$C_{i,j}$: Costo de transportar mercancía del Proveedor i al Distribuidor j .

$C_{j,k}$: Costo de transportar mercancía del Distribuidor j al Minorista k .

$C_{k,m}$: Costo de transportar mercancía del Minorista k al Mercado m .

F_i : Costo de abrir el Proveedor i .

F_j : Costo de abrir el Distribuidor j .

F_k : Costo de abrir el Minorista k .

V_i : Capacidad de almacenamiento y flujo del Proveedor i .

V_j : Capacidad de almacenamiento y flujo del Distribuidor j .

V_k : Capacidad de almacenamiento y flujo del Minorista k .

S_i : Probabilidad de que el Proveedor i funcione.

S_j : Probabilidad de que el Distribuidor j funcione.

S_k : Probabilidad de que el Minorista k funcione.

S^* : Confiabilidad deseada del sistema.

D_m : Demanda del Mercado m .

Variables de Decisión:

$X_{i,j}$: Cantidad a transportar del Proveedor i al distribuidor j .

$X_{j,k}$: Cantidad a transportar del Distribuidor j al Minorista k .

$X_{k,m}$: Cantidad a transportar del Minorista k al Mercado m .

Y_i : Variable binaria que indica si se abre el Proveedor i .

Y_j : Variable binaria que indica si se abre el Distribuidor j .

Y_k : Variable binaria que indica si se abre el Minorista k .

Función de Valor Esperado:

Z_{\min} : Costo total esperado de operación de la cadena de suministro.

El modelo propuesto para resolver el problema de continuidad de flujo en la cadena de suministro sería el denominado CFRM y es el presentado a continuación:

$$Z_{\min} = \sum_{i \in I} F_i Y_i + \sum_{j \in J} F_j Y_j + \sum_{k \in K} F_k Y_k + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} C_{ij} X_{ij} + \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} C_{jk} X_{jk} + \sum_{k \in K} \sum_{m \in M} C_{km} X_{km} \quad (3.6)$$

S. a:

$$\sum_{i \in I} X_{ij} = \sum_{k \in K} X_{jk} \quad \forall j \in J \quad (3.7)$$

$$\sum_{j \in J} X_{jk} = \sum_{m \in M} X_{km} \quad \forall k \in K \quad (3.8)$$

$$\sum_{k \in K} X_{km} = D_m \quad \forall m \in M \quad (3.9)$$

$$\sum_{j \in J} X_{ij} \leq V_i \times Y_i \quad \forall i \in I \quad (3.10)$$

$$\sum_{k \in K} X_{jk} \leq V_j \times Y_j \quad \forall j \in J \quad (3.11)$$

$$\sum_{m \in M} X_{km} \leq V_k \times Y_k \quad \forall k \in K \quad (3.12)$$

$$Y_i, Y_j, Y_k \in \{0; 1\} \quad \forall i \in I, \forall j \in J, \forall k \in K \quad (3.13)$$

$$X_{ij}, X_{jk}, X_{km} \geq 0 \quad \forall i \in I, \forall j \in J, \forall k \in K \quad (3.14)$$

$$(1 - \prod_{i \in I} (1 - (Y_i \times S_i))) \times (1 - \prod_{j \in J} (1 - (Y_j \times S_j))) \times (1 - \prod_{k \in K} (1 - (Y_k \times S_k))) \geq S^* \quad (3.15)$$

En primera instancia las ecuaciones (3.7), (3.8) y (3.9) hacen referencia a las restricciones de flujo de material en donde se conservan las cantidades que entran y salen de cada nodo. Esto significa que todo lo que llega a cada uno de los

distribuidores desde los proveedores es exactamente igual a lo que venden los distribuidores a los minoristas y a su vez lo que estos despachan a los clientes finales donde $\sum_{\forall i \in I} X_{ij}$, $\sum_{\forall j \in J} X_{jk}$ y $\sum_{\forall k \in K} X_{km}$ son las cantidades totales de material despachados desde todos los proveedores hacia cada uno de los distribuidores j , minoristas k , y mercados m .

Las restricciones de flujo de material entre los nodos para el diseño de cadenas de suministro se trabajan de manera frecuente como un modelo de conservación para simplicidad de las expresiones matemáticas y se decidió mantenerlo de esta manera debido a que el objetivo principal de la propuesta se concentra en la confiabilidad de la cadena de suministro y no en la complejidad del flujo de material.

Las ecuaciones (3.10), (3.11) y (3.12) son las restricciones de capacidad para los nodos, en donde la suma de todos los despachos de material que se hagan desde una unidad de cualquier eslabón, a excepción de los mercados, hacia todos sus clientes directos no debe superar una cota superior previamente parametrizada, donde $\sum_{\forall j \in J} X_{ij}$, $\sum_{\forall k \in K} X_{jk}$ y $\sum_{\forall m \in M} X_{km}$ son las cantidades totales de material despachados desde cada uno de los proveedores i , distribuidores j y minoristas k hacia cada uno de sus clientes.

La ecuación (3.13) establece las variables binarias que indican la apertura de un nodo cualquiera y la ecuación (3.14) hace referencia a la no negatividad de ninguna de las variables.

La restricción que permite que el modelo construya una cadena de suministro confiable, principal objetivo de este, es la condición de confiabilidad deseada del sistema, a la que hace referencia la ecuación (3.15). Esta consiste en determinar la probabilidad de que el sistema funcione a pesar de las fallas en al menos uno de los caminos para llegar desde los proveedores al mercado a través de distribuidores y minoristas y hacer que esta sea mayor al parámetro de confiabilidad deseada.

Tomando como ejemplo un eslabón completo de proveedores de la cadena de suministro podemos determinar que la probabilidad de que este falle es el producto de cada una de las probabilidades individuales de falla de los proveedores. La probabilidad de que un proveedor i falle viene dada por la expresión $(1 - (Y_i \times S_i))$ que hace referencia al complemento de la probabilidad de que dicho proveedor se encuentre funcionando normalmente, por lo que podemos deducir que la probabilidad de que el eslabón completo falle viene dada por la siguiente expresión:

$$\prod_{i \in I} (1 - (Y_i \times S_i))$$

Al determinar el complemento de esta última expresión estaríamos obteniendo la probabilidad de que al menos un nodo del eslabón de proveedores se encuentre funcionando en perfectas condiciones. Al replicar la expresión para los demás eslabones, del producto se obtiene la probabilidad de que al menos un nodo de cada uno de los eslabones que tienen probabilidad de fallar esté funcionando correctamente, que es equivalente a decir que con dicha probabilidad se conserva el flujo continuo del sistema desde el proveedor hasta el mercado pasando material a través de distribuidores y minoristas. La expresión matemática quedaría de la siguiente manera:

$$\left(1 - \prod_{i \in I} (1 - (Y_i \times S_i))\right) \times \left(1 - \prod_{j \in J} (1 - (Y_j \times S_j))\right) \times \left(1 - \prod_{k \in K} (1 - (Y_k \times S_k))\right) \geq S^*$$

Donde S^* es la confiabilidad deseada del sistema y cota inferior de la expresión anteriormente mencionada. Esto es posible porque asumimos que todas las probabilidades de que cualquier nodo se encuentre funcionando en un momento determinado son independientes entre si y dichas probabilidades se determinan mediante observación utilizando el método de Waters (2007) para indicar la probabilidad de ocurrencia de una falla de manera independiente. De igual manera se utilizará este supuesto para los demás modelos planteados en esta investigación.

Por último la ecuación (3.6) hace referencia a la adición de los costos fijos de apertura de un elemento de cada eslabón con los costos de transporte entre ellos, cuyo objetivo principal es minimizar la expresión hasta llegar a una solución óptima que satisfaga todas las restricciones.

Como propuesta para una segunda solución del modelo CFRM utilizando el mismo esquema, se eliminaría el parámetro de confiabilidad deseada y se establecerían dos funciones objetivo utilizando los costos de operación de la cadena de suministro y la probabilidad de que el sistema funcione:

$$Z_1 = \sum_{i \in I} F_i Y_i + \sum_{j \in J} F_j Y_j + \sum_{k \in K} F_k Y_k + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} C_{ij} X_{ij} + \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} C_{jk} X_{jm} + \sum_{k \in K} \sum_{m \in M} C_{km} X_{km}$$

$$Z_2 = \left(1 - \prod_{i \in I} (1 - (Y_i \times S_i))\right) \times \left(1 - \prod_{j \in J} (1 - (Y_j \times S_j))\right) \times \left(1 - \prod_{k \in K} (1 - (Y_k \times S_k))\right)$$

De esta manera estaríamos garantizando que el modelo nos dará como resultado un frente de Pareto en donde se muestren las soluciones no dominadas tomando como referencia el costo total de operaciones del sistema contra su confiabilidad.

Este modelo será evaluado en el capítulo 4 de esta investigación elaborando escenarios simulados y optimizándolos para comparar los resultados con el resto de las propuestas que se expondrán más adelante.

A continuación se presentará la elaboración del segundo modelo matemático para el diseño y gestión de cadenas de suministro confiables basadas en el concepto de confiabilidad total el cual consiste en la probabilidad de que todos los eslabones de la cadena de suministro se encuentren funcionando perfectamente.

3.1.1.2 Modelo de Confiabilidad Total de Eslabones (TERM)

El modelo de confiabilidad total de eslabones (TERM por sus siglas en inglés) es un modelo de diseño y gestión de cadenas de suministro confiables en el que modificaremos el concepto básico del modelo CFRM y cambiaremos la forma de medir la confiabilidad de los nodos basados en el concepto de establecer la probabilidad de que el sistema completo (todos los nodos para este caso) permanezca funcionando en perfectas condiciones.

Dado esta nueva aproximación, reemplazamos el concepto de confiabilidad total en el modelo CFRM para proponer una nueva solución al problema de minimización de la probabilidad de ocurrencia de falla alguna en cadenas de suministro llamado TERM presentado a continuación:

$$Z_{\min} = \sum_{i \in I} F_i Y_i + \sum_{j \in J} F_j Y_j + \sum_{k \in K} F_k Y_k + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} C_{ij} X_{ij} + \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} C_{jk} X_{jk} + \sum_{k \in K} \sum_{m \in M} C_{km} X_{km}$$

S. a:

$$\begin{aligned} \sum_{i \in I} X_{ij} &= \sum_{k \in K} X_{jk} & \forall j \in J \\ \sum_{j \in J} X_{jk} &= \sum_{m \in M} X_{km} & \forall k \in K \\ \sum_{k \in K} X_{km} &= D_m & \forall m \in M \\ \sum_{j \in J} X_{ij} &\leq V_i \times Y_i & \forall i \in I \\ \sum_{k \in K} X_{jk} &\leq V_j \times Y_j & \forall j \in J \\ \sum_{m \in M} X_{km} &\leq V_k \times Y_k & \forall k \in K \\ Y_i, Y_j, Y_k &\in \{0; 1\} & \forall i \in I, \forall j \in J, \forall k \in K \\ X_{ij}, X_{jk}, X_{km} &\geq 0 & \forall i \in I, \forall j \in J, \forall k \in K \end{aligned}$$

$$(\prod_{i \in I} (S_i)^{Y_i}) \times (\prod_{j \in J} (S_j)^{Y_j}) \times (\prod_{k \in K} (S_k)^{Y_k}) \geq S^* \quad (3.17)$$

Con respecto al modelo CFRM el único cambio que presenta el modelo TERM es la ecuación (3.17) que hace referencia a la confiabilidad del sistema. En este modelo

definimos las confiabilidades para cada uno de los nodos como la probabilidad de que este se encuentre funcionando en perfectas condiciones, descartamos el complemento (probabilidad de que el nodo falle), y reemplazamos directamente en la ecuación de confiabilidad para obtener la siguiente expresión:

$$\left(\prod_{i \in I} (S_i)^{Y_i}\right) \times \left(\prod_{j \in J} (S_j)^{Y_j}\right) \times \left(\prod_{k \in K} (S_k)^{Y_k}\right) \geq S^*$$

Donde S^* hace referencia al parámetro de entrada definido como la probabilidad deseada de funcionamiento de todos los nodos de la cadena de suministro. Nuevamente se asume que las confiabilidades definidas para cada uno de los nodos son independientes entre si, lo que permite que podamos desarrollar las productorias. La razón por la cual no se utilizó la expresión $Y \times S$ como la confiabilidad de un nodo específico es porque en caso de que un nodo no se tenga en cuenta para la cadena el valor de la variable binaria Y será igual a 0 por lo tanto la expresión $Y \times S$ también tendería a 0, enviando la productoria tal cual la presentamos en el modelo CFRM a cero eliminando las posibilidades de acertar la confiabilidad deseada. Con este nuevo cambio, al tener la expresión S^Y nos aseguramos que en el caso de que un nodo no esté abierto, el resultado de la ecuación sería igual a 1 valor que al multiplicarlo con los otros componentes de la productoria no afecte la probabilidad resultante.

De igual manera que para el modelo CFRM se propone una segunda solución a este problema en donde removemos el concepto de confiabilidad deseada y cambiamos la función objetivo inicial a dos funciones resultando un modelo multiobjetivo donde se tienen los costos esperados de operación de la cadena de suministro por un lado y la probabilidad de que el sistema se encuentre funcionando correctamente en todos sus componentes por el otro.

$$Z_1 = \sum_{i \in I} F_i Y_i + \sum_{j \in J} F_j Y_j + \sum_{k \in K} F_k Y_k + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} C_{ij} X_{ij} + \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} C_{jk} X_{jm} + \sum_{k \in K} \sum_{m \in M} C_{km} X_{km}$$

$$Z_2 = \left(\prod_{i \in I} (S_i)^{Y_i} \right) \times \left(\prod_{j \in J} (S_j)^{Y_j} \right) \times \left(\prod_{k \in K} (S_k)^{Y_k} \right)$$

Esta segunda aproximación tomaría un gran sentido en su aplicación, dado que es muy difícil determinar una confiabilidad deseada de funcionamiento de todos los nodos simultáneamente. Establecer la confiabilidad deseada como parámetro de entrada tendría que tomar por consideración con anterioridad otros atributos del problema como cantidad de eslabones, cantidad de nodo por los mismos, además de evaluar el mejor escenario de confiabilidad posible y realizar ciertos estimados como número de nodos permitidos para apertura, entre otros, por lo que este último escenario brinda una alternativa para no preocuparnos tanto por la confiabilidad del sistema sino por la optimización que brindará las mejores soluciones posibles dentro de un frente de Pareto que bien puede minimizar los costos de operación de la cadena de suministro, como maximizar la confiabilidad u obtener buenos resultados para ambos simultáneamente.

A continuación se trabaja de manera independiente la confiabilidad que hemos determinado para los nodos y un nuevo concepto que se introduce el cual consiste en la probabilidad de que los arcos o aristas que conectan a los nodos en un tercer modelo el cual definimos como un nuevo modelo llamado confiabilidad total de la red de suministro.

3.1.1.3 Modelo de Confiabilidad Total de la Red de Suministro (TNRM)

El modelo de confiabilidad total de la red de suministro (TNRM por sus siglas en inglés) como su nombre lo indica hace referencia al desarrollo de una herramienta que permita el diseño y la gestión de una cadena de suministro bajo un criterio de confiabilidad que establece como prioridad el correcto funcionamiento de toda la red de abastecimiento, es decir que todos los nodos y los arcos estén funcionando correctamente.

La tercera propuesta se asemeja mucho al modelo TERM, el cual tomaremos como base para desarrollo del modelo TNRM para resolver el problema de diseño y gestión de cadenas de suministro con confiabilidad total en nodos y arcos como se describe a continuación:

$$Z_{\min} = \sum_{i \in I} F_i Y_i + \sum_{j \in J} F_j Y_j + \sum_{k \in K} F_k Y_k + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} C_{ij} X_{ij} + \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} C_{jk} X_{jk} + \sum_{k \in K} \sum_{m \in M} C_{km} X_{km}$$

S. a:

$$\sum_{i \in I} X_{ij} = \sum_{k \in K} X_{jk} \quad \forall j \in J$$

$$\sum_{j \in J} X_{jk} = \sum_{m \in M} X_{km} \quad \forall k \in K$$

$$\sum_{k \in K} X_{km} = D_m \quad \forall m \in M$$

$$\sum_{j \in J} X_{ij} \leq V_i \times Y_i \quad \forall i \in I$$

$$\sum_{k \in K} X_{jk} \leq V_j \times Y_j \quad \forall j \in J$$

$$\sum_{m \in M} X_{km} \leq V_k \times Y_k \quad \forall k \in K$$

$$Y_i, Y_j, Y_k \in \{0; 1\} \quad \forall i \in I, \forall j \in J, \forall k \in K$$

$$X_{ij}, X_{jk}, X_{km} \geq 0 \quad \forall i \in I, \forall j \in J, \forall k \in K$$

$$B_{ij} = \begin{cases} 1; & \text{si } X_{ij} \cdot Y_i \cdot Y_j > 0 \\ 0; & \text{en otro caso} \end{cases}, \quad \forall i, j \quad (3.18)$$

$$B_{jk} = \begin{cases} 1; & \text{si } X_{jk} \cdot Y_j \cdot Y_k > 0 \\ 0; & \text{en otro caso} \end{cases}, \quad \forall j, k \quad (3.19)$$

$$B_{km} = \begin{cases} 1; & \text{si } X_{km} \cdot Y_k > 0 \\ 0; & \text{en otro caso} \end{cases}, \quad \forall k, m \quad (3.20)$$

$$S^N \times S^A \geq S^* \quad (3.21)$$

Para el análisis de las nuevas restricciones se toma como ejemplo cualquier arco comprendido entre los eslabones del Proveedor (I) y el Distribuidor (J). Se sabe que un proveedor i se encuentra abierto si y solo si la variable binaria asociada a el (Y_i) es igual a 1. De igual manera ocurre con los distribuidores, quienes dependen de la

variable binaria (Y_j). Esto significa que solamente está permitido el tráfico entre dos elementos de los eslabones i y j si y solo si el producto entre las variables binarias Y_i y Y_j es igual a 1. El hecho de que esta condición se cumpla no implica necesariamente que el arco se encuentre en uso, puesto que la cantidad de producto transportada a través de un arco habilitado específico puede ser cero.

Por esta razón para el cálculo de confiabilidad de los arcos en la cadena de suministro solo se tendrán en cuenta aquellas conexiones que contemplen el traspaso de mercancía entre eslabones. Como resultado se establecen las ecuaciones (3.18), (3.19) y (3.20) que hacen referencia a una variable binaria que representa la relación entre las cantidades transportadas entre eslabones y la confiabilidad de un arco para determinar la probabilidad de que el transporte entre el proveedor i y el distribuidor j no se vea interrumpido en un momento determinado.

La ecuación (3.21) se refiere a la confiabilidad total de nodos y arcos del sistema para la que se necesitan las siguientes variables:

$S_{i,j}$: Probabilidad de que la conexión entre el Proveedor i y el Distribuidor j se encuentre funcionando correctamente.

$S_{j,k}$: Probabilidad de que la conexión entre el Distribuidor j y el Minorista k se encuentre funcionando correctamente.

$S_{k,m}$: Probabilidad de que la conexión entre el Minorista k y el Mercado m se encuentre funcionando correctamente.

Para efectos de nuestra investigación, estos atributos para poder ser definidos como parámetros de entrada deben ser independientes a las confiabilidades de los nodos e independientes entre si, por poner un ejemplo que el transporte entre el proveedor i y el distribuidor j esté a cargo de un agente externo y de esta manera obtener una probabilidad de falla en el transporte de acuerdo a observación y experimentación y

no una variable dependiente de la confiabilidad o la toma de decisiones en cualquiera de los nodos involucrados.

En primera instancia se deduce que la probabilidad de que todos los arcos completos entre los nodos que conforman los eslabones proveedor y distribuidor permanezcan funcionando correctamente viene dada por la siguiente expresión:

$$\prod_{i \in I} \prod_{j \in J} [(S_{ij})^{B_{ij}}]$$

Esta última expresión vendría siendo la probabilidad de que el transporte entre el eslabón de proveedores y el eslabón de distribuidores se encuentre funcionando normalmente independientemente de los nodos involucrados y replicando esta expresión para los demás eslabones, de su producto se obtiene la probabilidad de que todos los arcos que conectan el sistema se encuentren en perfectas condiciones, probabilidad a la que llamamos S^A y la representamos en la siguiente expresión:

$$S^A = \prod_{i \in I} \prod_{j \in J} [(S_{ij})^{B_{ij}}] \times \prod_{j \in J} \prod_{k \in K} [(S_{jk})^{B_{jk}}] \times \prod_{k \in K} \prod_{m \in M} [(S_{km})^{B_{km}}]$$

También expresamos la confiabilidad total de los nodos en una simple variable para simplicidad de las ecuaciones, representándola como S^N y obteniendo el siguiente resultado:

$$S^N = \left(\prod_{i \in I} (S_i)^{Y_i} \right) \times \left(\prod_{j \in J} (S_j)^{Y_j} \right) \times \left(\prod_{k \in K} (S_k)^{Y_k} \right)$$

Como se puede observar, S^N es equivalente a la expresión de confiabilidad del modelo TERM.

La ecuación resultante del producto entre S^A y S^N equivale a la confiabilidad total de la red de abastecimiento y se utiliza para la restricción de confiabilidad expuesta a continuación:

$$S^N \times S^A \geq S^*$$

La anterior ecuación supone la restricción de confiabilidad total del sistema en donde nos aseguramos que el diseño de la cadena de suministro tenga por lo menos una probabilidad S^* de que todos sus nodos y sus arcos tengan un correcto funcionamiento simultáneamente.

El modelo TNRM se expresa tanto en su función objetivo como en cada una de sus restricciones de igual manera que se realiza en el modelo TERN, con la única diferencia de que este modelo TNRM incluye la interacción entre las confiabilidades de los nodos y los arcos de manera independiente.

Además se agregan tres restricciones al modelo, las cuales corresponden a cada una de las variables binarias evaluadas para todos los arcos que indican si estos además de estar habilitados, se están utilizando o no.

El modelo TNRM al igual que el modelo TERM presenta la dificultad de poder determinar como parámetro de entrada el atributo de confiabilidad total deseada por los problemas descritos en el modelo TERM, por lo que cabe analizar la creación de un segundo escenario en donde se analicen los objetivos de costos esperados de operación y confiabilidad del sistema por separado. Las ecuaciones resultantes se definen de la siguiente manera:

$$Z_1 = \sum_{i \in I} F_i Y_i + \sum_{j \in J} F_j Y_j + \sum_{k \in K} F_k Y_k + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} C_{ij} X_{ij} + \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} C_{jk} X_{jm} + \sum_{k \in K} \sum_{m \in M} C_{km} X_{km}$$

$$Z_2 = S^N \times S^A$$

En el siguiente capítulo se presentan los resultados de la optimización de casos particulares que se consideran pertinentes para evaluar los modelos desarrollados

para determinar la diferencia entre los objetivos planteados para cada uno y establecer una relación entre el tipo de modelo que deseemos evaluar y el resultado que queremos obtener.

CAPÍTULO IV. VALIDACIÓN DE MODELOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL DISEÑO CADENAS DE SUMINISTRO CONFIABLES

4.1 EVALUACIÓN DE MODELOS DE OPTIMIZACIÓN

Los modelos de confiabilidad para el diseño y gestión óptima de cadenas de suministro se evaluaron mediante la creación de varios escenarios acorde a las especificaciones del sistema de abastecimiento planteado inicialmente, con el que se determinará el desempeño de cada una de las propuestas. A continuación se presentan los parámetros de los escenarios propuestos con una breve descripción de los mismos:

4.1.1 ESCENARIOS DE EVALUACIÓN DE MODELOS DE OPTIMIZACIÓN

Para la evaluación de los modelos de optimización se crearon 3 modelos con diferentes cantidades de nodos I , J , K y M donde I hace referencia a los Proveedores, J a los Distribuidores, K a los Minoristas y M a los Mercados. Cada uno de los modelos tiene las siguientes consideraciones:

Tabla 3 Descripción Modelo 1

| Modelo 1 | |
|----------------|----------|
| Nodos | Cantidad |
| Proveedores | 2 |
| Distribuidores | 3 |
| Minoristas | 4 |
| Mercados | 4 |

Tabla 4 Descripción Modelo 2

| Modelo 2 | |
|----------------|----------|
| Nodos | Cantidad |
| Proveedores | 6 |
| Distribuidores | 8 |
| Minoristas | 10 |
| Mercados | 10 |

Tabla 5 Descripción Modelo 3

| Modelo 3 | |
|----------------|----------|
| Nodos | Cantidad |
| Proveedores | 14 |
| Distribuidores | 17 |
| Minoristas | 22 |
| Mercados | 22 |

Cada uno de estos modelos es evaluado en dos escenarios diferentes, los cuales son explicados a continuación:

4.1.1.1 Descripción Escenario 1

Para la creación de este escenario se tiene como primera consideración la creación de proveedores cuya capacidad viene dada por la siguiente ecuación:

$$V_i = 4000 - (3000 \times \alpha)$$

Donde α es un número aleatorio entre 0 y 1, lo que da como resultado que V_i se mueva con valores aleatorios entre 1000 y 4000 unidades de capacidad. De la misma manera se determinan los valores para las capacidades de los distribuidores y los minoristas utilizando una ecuación basada en números aleatorios, las cuales se describen a continuación:

$$V_j = 3500 - (2750 \times \alpha) \quad V_k = 2500 - (2000 \times \alpha)$$

Obteniendo como resultados que la capacidad de los distribuidores sea un número aleatorio entre 750 y 3500 unidades y de igual forma la capacidad de los minoristas sea un valor aleatorio entre 500 y 2500 unidades.

Para las confiabilidades de los nodos se utilizan las siguientes expresiones:

$$S_i = 1 - (0,07 \times \alpha) \quad S_j = 1 - (0,07 \times \alpha) \quad S_k = 1 - (0,07 \times \alpha)$$

Si bien podemos observar, las expresiones para determinar la confiabilidad en los proveedores, distribuidores y minoristas es la misma y da como resultado un número aleatorio entre 0,93 y 1,0.

Una vez determinadas las capacidades y las confiabilidades de cada uno de los nodos, se calculan los costos de apertura de estos de acuerdo a las siguientes expresiones:

$$F_i = V_i \times S_i \times 100 \quad F_j = V_j \times S_j \times 100 \quad F_k = V_k \times S_k \times 100$$

Como podemos observar para el Escenario 1 los costos de apertura de los nodos tienen una relación directa con las capacidades y la confiabilidad de cada uno de ellos. Esto tomando como supuesto que una mayor confiabilidad y/o una mayor capacidad de almacenamiento y flujo el costo de operación se eleva proporcionalmente.

Para determinar los costos de transporte de proveedores a distribuidores, distribuidores a minoristas y minoristas a mercados se utilizan las siguientes expresiones:

$$C_{i,j} = 100 - (60 \times \alpha) \quad C_{j,k} = 80 - (40 \times \alpha) \quad C_{k,m} = 80 - (55 \times \alpha)$$

Lo que da como resultado las siguientes expresiones:

$$40 \leq C_{i,j} \leq 100 \quad 40 \leq C_{j,k} \leq 80 \quad 25 \leq C_{k,m} \leq 80$$

A partir de estos costos de transporte se calcula la confiabilidad del mismo relacionándolos directamente obteniendo las siguientes expresiones:

$$0,88 \leq S_{i,j} \leq 1 \quad 0,9 \leq S_{j,k} \leq 1 \quad 0,9 \leq S_{k,m} \leq 1$$

Por último se precede a determinar una ecuación para determinar la demanda, la cual corresponde a la siguiente expresión:

$$D_m = 1000 - (550 \times \alpha)$$

Con la ecuación anterior aseguramos que la demanda se moverá aleatoriamente entre los valores de 450 y 1000. La explicación de la determinación de estos valores de demanda se refiere al aseguramiento de una holgura correspondiente al número de nodos necesarios para satisfacerla, con el fin de que el modelo pueda considerar múltiples opciones de soluciones y sea menos restrictivo.

En resumen, el Escenario 1 intenta evaluar el comportamiento de los modelos de optimización teniendo en cuenta que los costos y la confiabilidad de nodos y arcos están relacionados directamente.

4.1.1.2 Descripción Escenario 2

El Escenario 2 planteado para cada uno de los tres modelos es muy parecido al Escenario 1, con la única diferencia que para este caso se determinan los costos de acuerdo a una relación inversa con las capacidades de los nodos y las confiabilidades tanto de nodos como de arcos.

Las capacidades y confiabilidades de los nodos se calculan con las mismas expresiones utilizadas para el Escenario 1, pero los costos se calculan de acuerdo a las siguientes expresiones:

$$F_i = \frac{400000000}{V_i \times S_i} \quad F_j = \frac{400000000}{V_j \times S_j} \quad F_k = \frac{400000000}{V_k \times S_k}$$

Los valores de los costos de operación de los nodos se moverán entre parámetros muy similares a los del Escenario 1 pero con la diferencia que ahora su relación con la confiabilidad y la capacidad de almacenamiento es inversa.

Las fórmulas para determinar las confiabilidades de los arcos en el Escenario 2 establecen valores dentro del mismo rango que las mismas confiabilidades en el Escenario 1, con la diferencia que su cálculo se basa en una relación inversa con los costos. Lo que nos permite evaluar un caso contrario para verificar con mayor detalle el comportamiento de los modelos de optimización.

La demanda para este segundo escenario se también determina exactamente de la misma manera que en el Escenario 1 lo que nos ayudará a evaluar discrepancias en la solución de modelos similares.

4.1.2 RESULTADOS DE MODELOS DE OPTIMIZACIÓN

Una vez con todos los parámetros de entrada de los modelos establecidos, se procede a la optimización para lo cual se usó el algoritmo evolutivo diseñado por Ariza (2012) basado en el SPEA-2 para la solución de problemas multiobjetivo de cadenas de suministro confiables utilizando cada uno de los modelos matemáticos propuestos.

Cada uno de los modelos con sus respectivos escenarios se corrieron usando 10 réplicas para obtener mejores resultados y más confiables que se muestran a continuación con su respectivo análisis.

Para el primer escenario donde los costos de operación tienen una relación directa con las capacidades y la confiabilidad, el Modelo 1 presenta el siguiente comportamiento: Cabe resaltar que para la siguiente ilustración y los frentes de Pareto que se presentarán a lo largo de la descripción de los resultados obtenidos, los costos vienen dados en Miles de Pesos y la confiabilidad dada como una probabilidad.

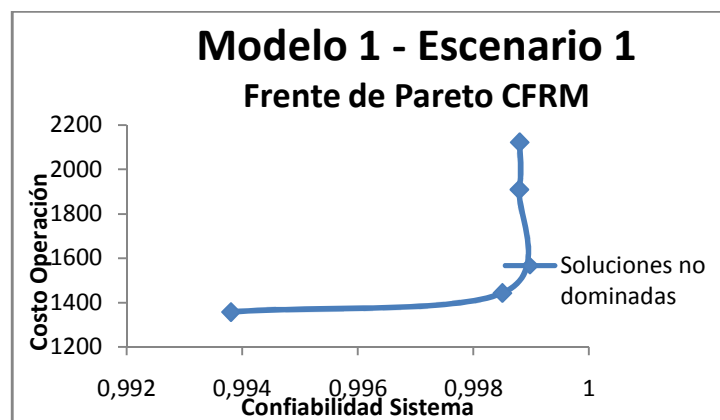


Ilustración 5: Frente de Pareto soluciones no dominadas CFRM. Mod 1 – Esc 1.

Al correr el modelo de optimización utilizando la técnica CFRM sobre este escenario se obtienen 4 soluciones en donde la confiabilidad es muy cercana a 1 en todos los casos pero existen diferencias muy marcadas en los costos de operación (Ver Ilustración 5). Los otros modelos matemáticos (TERM, TNRM) empleados para resolver este escenario se comportaron de la siguiente manera:

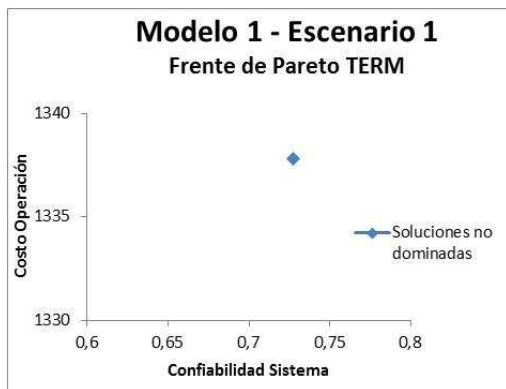


Ilustración 6: TERM Mod 1 – Esc 1.

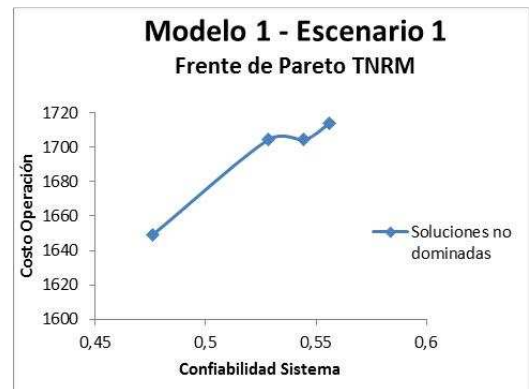


Ilustración 7: TNRM Mod 1 – Esc 1.

El modelo TERM solo encontró una solución no dominada al problema, por lo que muy probablemente este óptimo local sea un óptimo global para este modelo y escenario específico (Ver Ilustración 6), además de que supera en costos a cualquiera de las soluciones del modelo CFRM y basados en el modelo TNRM se obtuvieron 4 soluciones no dominadas al igual que en el primer modelo y al igual con costos superiores a los obtenidos con la técnica TERM (Ver Ilustración 7).

Se puede notar que al obtener soluciones no dominadas con diferentes costos utilizando las diversas técnicas existen faltantes en todas las gráficas, esto se debe a que a medida que los modelos aumentan en complejidad se vuelven más restrictivos por lo que se recomienda usar un mayor número de réplicas para obtener mejores soluciones.

A continuación se presentan los resultados de optimizar el Modelo 1 bajo los parámetros establecidos en el segundo escenario:

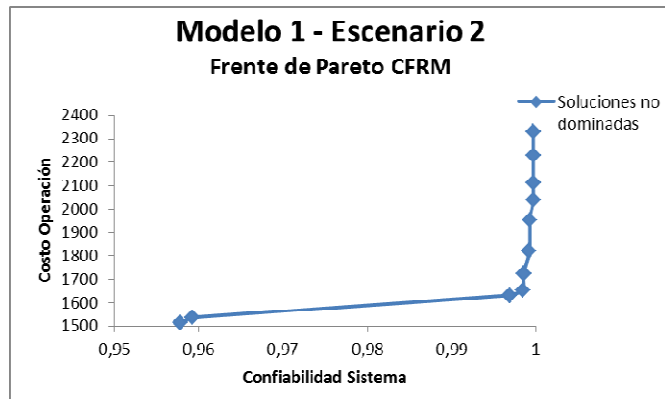


Ilustración 8: Frente de Pareto soluciones no dominadas CFRM. Mod 1 – Esc 2.

Como se puede observar en la Ilustración 8, el frente de Pareto determina un mayor número de soluciones no dominadas que el Escenario 1 para la técnica CFRM lo que supone que el comportamiento del modelo determina que a un menor nivel de restricción en el modelo mayor será el espacio de óptimos locales. Se establece que los segundos escenarios son menos restrictivos porque los costos tienen un comportamiento inverso a la confiabilidad lo que determina que es más fácil la escogencia de eslabones dado que los más confiables serán los menos costosos.

A continuación se presentan los demás resultados del primer modelo bajo el segundo escenario:

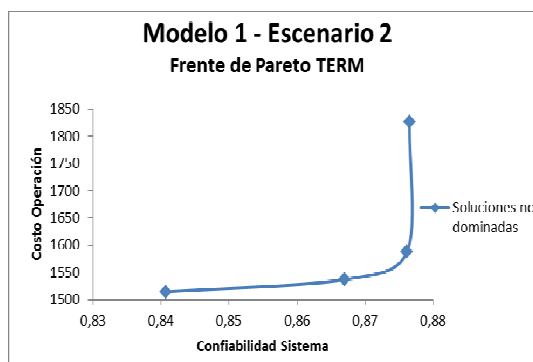


Ilustración 9: TERM Mod 1 – Esc 2.

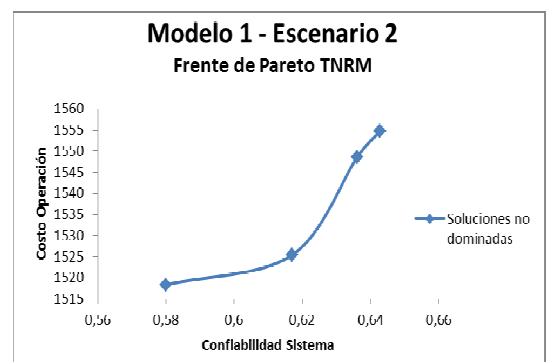


Ilustración 10: TNRM Mod 1 – Esc 2.

Los modelos TERM y TNRM en las Ilustraciones 9 y 10 respectivamente muestran 4 soluciones no dominadas cada uno, presentando una mejora considerable de acuerdo a la confiabilidad del sistema obtenida en las soluciones del primer escenario sin mostrar cambios abruptos en los costos de operación obedeciendo el principio en el que se basa este segundo escenario que permite que se puedan obtener sistemas de abastecimiento más confiables por el mismo o menor costo de operación.

A continuación se presentan las gráficas con los resultados del segundo modelo con sus respectivos escenarios:

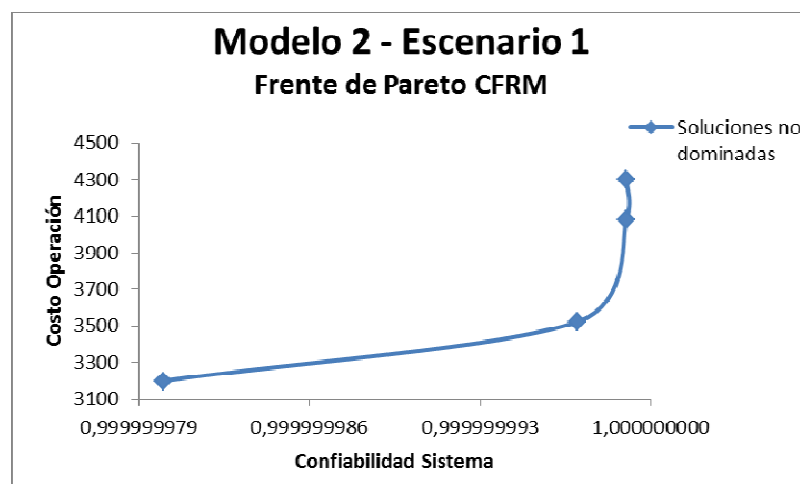


Ilustración 11: Frente de Pareto soluciones no dominadas CFRM. Mod 2 – Esc 1.

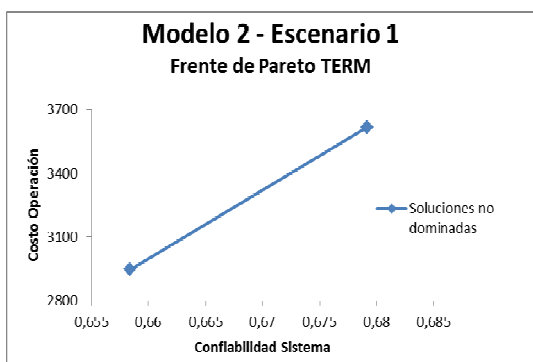


Ilustración 12: TERM Mod 2 – Esc 1.

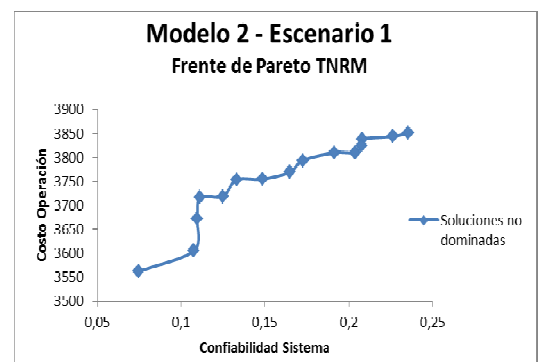


Ilustración 13: TNRM Mod 2 – Esc 1.

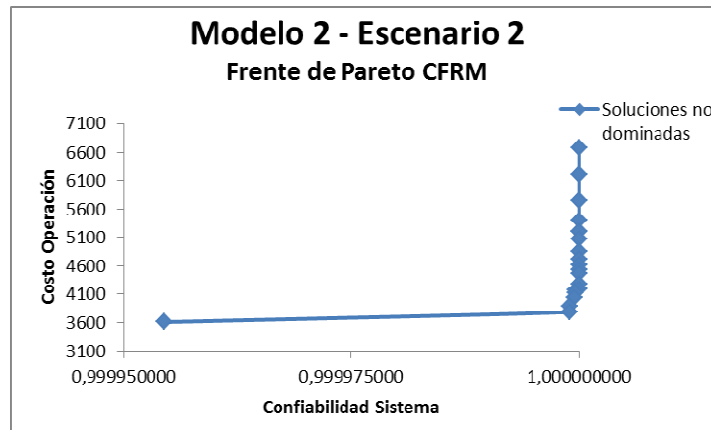


Ilustración 14: Frente de Pareto soluciones no dominadas CFRM. Mod 2 – Esc 2.

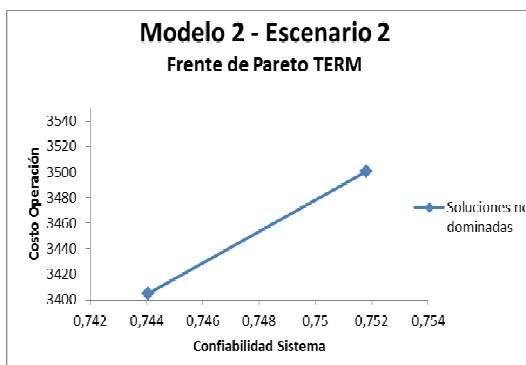


Ilustración 15: TERM Mod 2 – Esc 2.

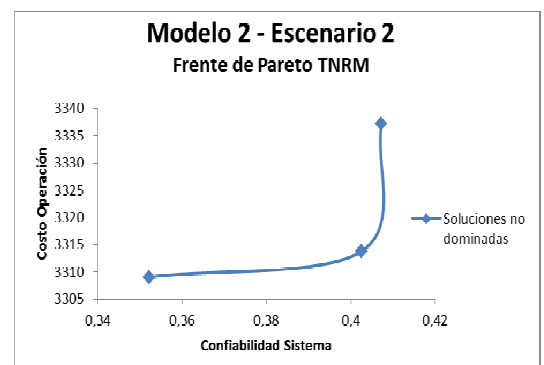


Ilustración 16: TNRM Mod 2 – Esc 2.

Las ilustraciones (11-16) muestran una clara tendencia exponencial para los modelos resueltos con la técnica CFRM, que al ser menos restrictiva y compleja su función de confiabilidad permite al algoritmo determinar muchos puntos como soluciones no dominadas.

También se puede observar que al aumentar el número de nodos a tener en cuenta en la optimización de cadenas de suministro confiables aumenta la probabilidad de que al menos un camino conecte el inicio de la cadena con el mercado final y permanezca funcionando sin interrupciones (CFRM). Caso contrario ocurre con las demás técnicas (TERM y TNRM) las cuales se comportan con una disminución en la probabilidad de todos los componentes permanezcan en funcionamiento y además

necesitarían aparentemente de un número mayor de réplicas para poder obtener resultados comparables con alguna aproximación a una función. Al igual que en el primer modelo, la técnica TERM es la que sigue mostrando la menor cantidad de soluciones no dominadas consolidando esta tendencia.

Por último se observan los resultados obtenidos para el tercer modelo con sus respectivos escenarios utilizando el SPEA-2:

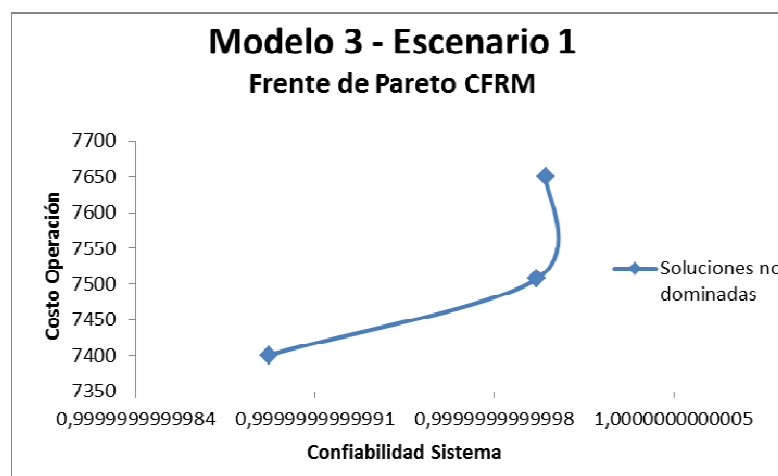


Ilustración 17: Frente de Pareto soluciones no dominadas CFRM. Mod 3 – Esc 1.

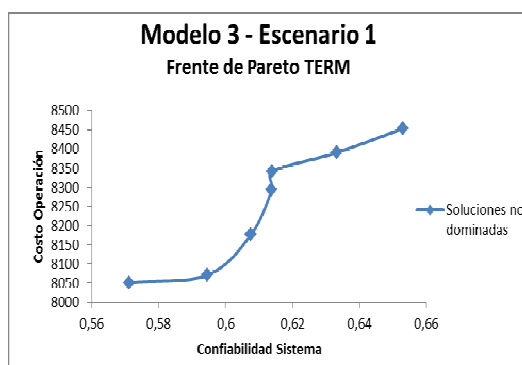


Ilustración 18: TERM Mod 3 – Esc 1.

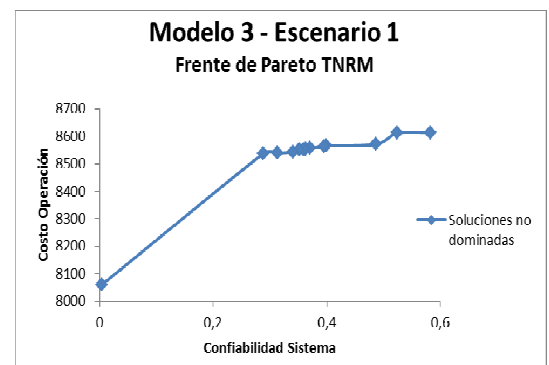


Ilustración 19: TNRM Mod 3 – Esc 1.

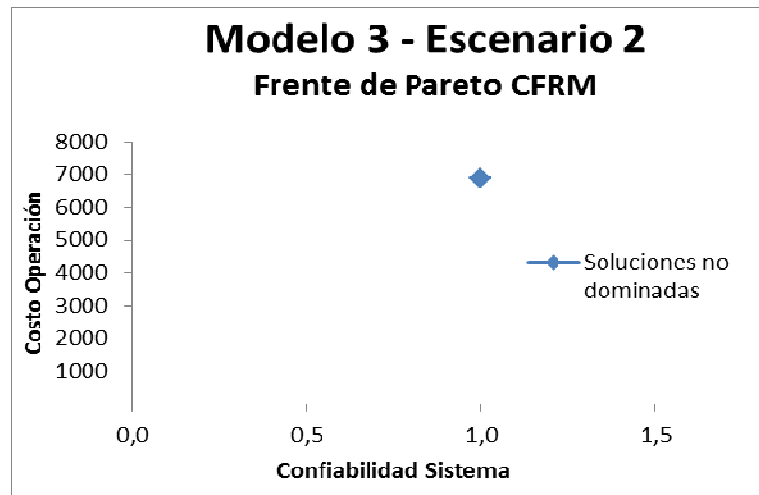


Ilustración 20: Frente de Pareto soluciones no dominadas CFRM. Mod 3 – Esc 2.

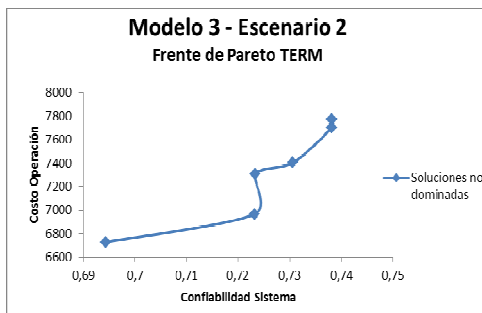


Ilustración 21: TERM Mod 3 – Esc 2.

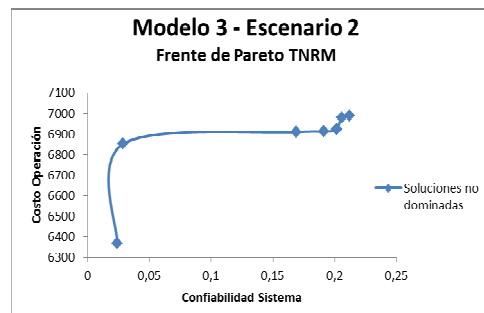


Ilustración 22: TNRM Mod 3 – Esc 2.

Prácticamente en el tercer modelo se pierden las tendencias de los datos mostradas en los primeros dos por el hecho de que se necesita un mayor número de réplicas para la optimización de este. Aunque cabe resaltar que como ventaja se tiene que ya existe una herramienta para la solución óptima de estos problemas basado en algoritmos evolutivos mediante los cuales se pueden establecer parámetros básicos para el diseño de cadenas de suministro confiables y el soporte para la toma de decisiones.

En general esta investigación nos muestra con un ejemplo básico que todos los modelos arrojan resultados diferentes para cada uno de sus escenarios, permitiendo a los usuarios de esta métrica tener opciones para optimizar de acuerdo al mejor

ajuste que su caso específico requiera, y también dependiendo del objetivo principal que este busque con la métrica de confiabilidad. Por ejemplo para el caso de una cadena de suministro que tenga suficiente capacidad para suplir la demanda del mercado en cada una de sus posibles instalaciones, convendría utilizar la solución del modelo CFRM, dado que este tiene como objetivo intrínseco maximizar el número de caminos desde el eslabón de proveedores hasta el mercado final para maximizar la probabilidad de que al menos se encuentre un camino abierto a pesar de interrupciones en el sistema. Esto corresponde a que debido a las altas capacidades de las instalaciones la cadena además de ser confiable sería resiliente aún después de interrupciones.

En el siguiente capítulo de este estudio se profundizará en las diferencias en los modelos y sobre sus posibles aplicaciones en una cadena de suministro real.

CAPÍTULO V. CONCLUSIONES E INVESTIGACIONES FUTURAS

Esta investigación arroja resultados fructíferos en la búsqueda de modelos de optimización que permitan el diseño y la gestión de cadenas de suministro confiables, por lo que es importante resaltar algunas de las conclusiones y encaminar futuras investigaciones para el desarrollo de modelos genéricos y específicos de confiabilidad.

5.1 CONCLUSIONES DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

Los modelos de confiabilidad para cadenas de suministro en su concepto son relativamente nuevos y poco estudiados en el ámbito de la investigación de operaciones. Esta investigación desarrolla un aporte importante a la literatura emergente ya que proporciona métricas novedosas relacionados con la forma de determinar la confiabilidad en una cadena de suministro y además se desarrollan modelos de diseño y gestión de sistemas de abastecimiento que procuran la búsqueda de un desempeño óptimo en cuanto a funcionamiento.

Durante el transcurso de esta investigación se desarrollaron en total tres modelos basados en el problema básico de diseño de cadenas de suministro de ubicación de instalaciones, cada uno de ellos con dos escenarios diferentes y con una métrica distintiva para identificar la confiabilidad del sistema. La aproximación que más se asemeja a la realidad es la del modelo TNRM (Total Network Reliability Model) cuyo desarrollo evalúa la confiabilidad tanto en nodos como en arcos de la red de abastecimiento ofreciendo una métrica más acertada que la de los dos primeros modelos, pero existen diferentes razones por las cuales se desarrollaron los otros modelos. Entre ellas se encuentra que el modelo CFRM (Continuous Flow Reliability Model) presenta una métrica completamente diferente a la de los demás modelos,

dato que su objetivo de confiabilidad no es garantizar que todo el sistema conectado se encuentre funcionando simultáneamente, por el contrario su meta es lograr con una alta probabilidad que el sistema a pesar de sufrir averías permanezca conectado en por lo menos un camino que sincronice desde el primer eslabón de la cadena hasta el mercado.

El modelo TERM (Total Echelon Reliability Model) es la base para la construcción del modelo TNRM. Se presenta este modelo puesto que es necesario explicar el origen de la métrica que permite que interactúen nodos y arcos en una función de confiabilidad y es importante que se puede expresar logarítmicamente como un modelo de programación entera mixta no lineal puesto que en un problema TNRM en donde la confiabilidad de todas los arcos es equivalente a uno, el problema se puede resolver como un modelo TERM con una programación más accesible.

En los casos donde se conoce la cadena de suministro pero escasea información acerca de las vías de conexión entre nodos que utiliza un proveedor externo de transporte y se cuenta con capacidad limitada para satisfacer la demanda convendría mayoritariamente el uso del modelo TERM. Esto con el fin de maximizar la probabilidad de funcionamiento de todos los nodos y confiando el transporte al proveedor externo. Para el caso en donde se conoce absolutamente toda la información de la red de abastecimiento, que se da en la mayoría de los casos, el modelo que más se ajusta a la realidad en el TNRM.

En conclusión en este proyecto de investigación se han creado tres modelos matemáticos de optimización para el diseño y gestión de cadenas de suministro confiables, cada uno con dos escenarios propuestos, por lo que consideramos que esta herramienta supone un aporte importante a la literatura actual y con el que abrimos espacio a múltiples investigaciones futuras.

Además establecemos que es posible crear cadenas de suministros confiables utilizando modelos de programación mixta no lineal y estableciendo parámetros de

confiabilidad deseada del sistema incluso presentando probabilidades de falla no solo en los nodos sino en los arcos de una red de suministros.

5.2 FUTURAS INVESTIGACIONES ASOCIADAS AL PROYECTO

Los modelos presentados durante el transcurso de esta investigación dejan las puertas abiertas para futuros investigadores que busquen perfeccionar la propuesta con algoritmos de optimización para el diseño y gestión de cadenas de suministro confiables. Una de las mejoras que se proponen a partir de esta propuesta es obtener una métrica para la confiabilidad parcial de una cadena de suministro que incluya probabilidades de falla tanto en los nodos como en los arcos que garantice que al menos quedan en funcionamiento suficientes nodos para comunicar la cadena de suministro desde el primer eslabón hasta el mercado objetivo de igual manera que los arcos que los conectan.

Otra de las investigaciones pendientes, no contemplada en los alcances de este estudio, es la implementación de técnicas de optimización multiobjetivo para resolver el TNRM (Total Network Reliability Model) en el que se pretende minimizar los costos de operación de la cadena de suministro al tiempo que se maximiza la confiabilidad total de la red. Se estima que el resultado definitivo de la evaluación de un sistema de abastecimiento bajo estos criterios será un gráfico frente de Pareto, en donde se mostrarán todos los valores de las soluciones no dominadas y sería una herramienta fundamental de soporte para la toma de decisiones gerenciales en el diseño y gestión de cadenas de suministro confiables.

Por último cabe resaltar que a pesar de que los modelos presentados en esta investigación garantizan cadenas de suministro confiables, no necesariamente estas son resilientes, es decir que los resultados no garantizan una rápida y eficaz respuesta del sistema para contrarrestar una falla. Dentro de futuras investigaciones se presentarán ideas de cómo combinar los modelos de confiabilidad con métricas

de resiliencia para que no solamente los modelos de optimización busquen el diseño de sistemas confiables sino que a pesar de las fallas, estos tengan excelente capacidad de respuesta.

Como se puede observar, el campo de investigación en confiabilidad de cadenas de suministro es muy amplio y no ha sido del todo explorado, por lo que se considera que este trabajo es una plataforma para futuras investigaciones relacionadas con estos tópicos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Azaron, A.; Brown, K.; Tarim, S.; Modarres, M. (2008). A multi-objective stochastic programming approach for supply chain design considering risk. *International Journal of Production Economies*, 116, 129-138.
- Ariza, R.; (2012). Algoritmo evolutivo para el diseño de cadenas de suministro resilientes y confiables. Tesis de maestría sin publicar. *Universidad del Norte*.
- Barlow, R. E.; Proschan, F. (1975) Statistical theory of reliability and life testing. Rinehart and Winston; Holt.
- Berman, O.; Krass, D.; Menezes, M. (2007). Facility Reliability Issues in Network p-Median Problems: Strategic Centralization and Co-Location Effects. *Operations Research*, 55(2), 332-350.
- Bienstock, D.; Brickell, E.; Monma, C. (1990). On the structure of minimum weight k-connected spanning networks. *SIAM Journal on Discrete Mathematics*, 3(3), 320-329.
- Cachon, G. (2003). Supply chain coordination with contracts. *Handbook in Operations Research and Management Science: Supply Chain Management*, The Netherlands, 229-339.
- Cai, K. Y. (1996). Introduction to fuzzy reliability. Boston: Kluwer.
- Cai, K. Y. (1996). System failure engineering and fuzzy methodology. An introductory overview. *Fuzzy Sets Syst*, 83, 113-146.
- Cerullo, V.; Cerullo, M. J. (2004). Business continuity planning: A comprehensive approach. *Information Systems Management*, 21(3), 70.

- Chapman, P.; Christopher, M.; Juttner, U.; Peck, H.; Wilding, R. (2002). Identifying and managing supply-chain vulnerability. *Logistics and Transport Focus*, 4(4), 59.
- Colbourn, C. (1987). The combinatorics of network reliability. The international series of monographs on computer science. New York: Oxford University Press.
- Crone, M. (2006). Are global Supply chains too Risky?. *Supply Chain Management Review*, 28-32.
- De Castro Menezes, M. (2004). Reliability issues in strategic location problems. Ph.D. dissertation submitted to University of Toronto.
- Denson, W. (1998). The history of reliability prediction. *IEEE Trans Reliab*; 47 (2-SP): 321–329.
- Edward, D. (2006). Risk mitigation in the supply chain: Examining the role of investment to manage safety performance. Ph.D. dissertation submitted to University of Maryland.
- Eiselt, H. A.; Gendreau, M.; Laporte, G. (1996). Optimal location of facilities on a network with an unreliable node or link. *Information Processing Letters*, 58(2), 71-74.
- Fischer, M.; Hammond, J.; Obermeyer, W.; Raman, A. (1994). Making supply meet demand in an uncertain world. *Harvard Business Review*, 72(3), 83.
- Fortz, B.; Labbé, M. (2002). Polyhedral results for two-connected networks with bounded rings. *Mathematical Programming Series A*, 93(1), 27-54.

- Grötschel, M.; Monma, C.; Stoer, M. (1995). Polyhedral and computational investigations for designing communication networks with high survivability requirements. *Operations Research*, 43(6), 1012-1024.
- Hardy, V.; Roberts, P. (2003). International emergency planning for facilities management. *Journal of Facilities Management*, 2(1), 7.
- Hauser, L. (2003). Risk-adjusted supply chain management. *Supply Chain Management Review*, 7(6), 64-71.
- Hsu, C.; Li, H. (2011). Reliability evaluation and adjustment of supply chain network design with demand fluctuations. *International Journal of Production Economies*, 132, 131-145.
- Jia, J.; Dyer, J.; Butler, J. (1999). Measures of perceived risk. *Management Science*, 45, 4, p. 519.
- Knight, R. (1991). Four decades of reliability progress. In: Proceedings of the annual reliability and maintainability symposium, IEEE, p. 156-216.
- Knight, R.; Petty, D. (2001). Philosophies of risk, shareholder value and the CEO. *Mastering Risk Volume I: Concepts*. Pearson Education Ltd.
- Lee, H.; Padmanabhan, V.; Whang, S. (1997). Information distortion in a supply chain. The bullwhip effect. *Management Science*, 43(4), 546.
- Lezhou, R. (2007). Models and algorithms for reliable facility location problems and system reliability optimization. Ph.D. Dissertation submitted to University Of Florida.
- Marcus, A.; Nichols, M. (1999). On the edge: Heeding the warnings of unusual events. *Organization Science*, 10(4), 482-499.

- McGee, A. (2008). Business continuity in the supply chain: Planning for disruptive events. Ph.D. Dissertation submitted to Michigan State University.
- Monma, C. L.; Spellman, B.; Pulleyblank, W. (1990). Minimum-weight two-connected spanning networks. *Mathematical Programming*, 46(2), 153-171.
- Monma, C.; Shallcross, D. (1989). Methods for designing communications networks with certain two-connected survivability constraints. *Operations Research*, 37(4), 531-541.
- Narayanan, V.; Raman, A. (2004). Aligning incentives for supply chain efficiency. *Harvard Business Review*, 82(11), 94-103.
- Perrow, C. (1984). Normal accidents: Living with high risk technologies. Basic Books, New York.
- Perrow, C. (1994). The limits of safety: the enhancement of a theory of accidents. *Journal of Contingencies and Crisis Management*, 2(4), 212-220.
- Perrow, C. (1999). Organizing to reduce the vulnerabilities of complexity. *Journal of Contingencies and Crisis Management*, 7(3), 150–155.
- Pich, M. T.; Loch, C. H.; Meyer, A. D. (2002). On uncertainty, ambiguity, and complexity in project management. *Management Science*, 48(8), 1008.
- Reichheld, F.; Schefter, P. (2000). E-loyalty: Your secret weapon on the web. *Harvard Business Review*, July-August, 105-114.
- Rijpma, J. A. (2003). From deadlock to dead end: the normal accidents – high reliability debate revisited. *Journal of Contingencies and Crisis Management*, 11(1), 37–45.

- Roberts, K.H. (1990a). Some characteristics of one type of high reliability organization. *Organization Science*, 1(2), 160–176.
- Roberts, K.H. (1990b). Managing high reliability organizations. *California Management Review*, 32(4), 101–113.
- Sheffi, T. (2005). The resilient enterprise: Overcoming vulnerability for competitive advantage. Cambridge, MA: MIT-Press.
- Sheffi, Y.; Rice, J.; Fleck, J.; Caniato, F. (2003). Supply chain response to global terrorism: a situation scan. *EurOMA-POMS Conference*.
- Shier, D. R. (1991). Network reliability and algebraic structures. Oxford: Clarendon Press.
- Shooman, M. L. (2002). Reliability of computer systems and networks: Fault tolerance, analysis, and design. New York: John Wiley and Sons.
- Snyder, L. (2003). Supply chain robustness and reliability: models and algorithms. Ph.D. dissertation submitted to Northwestern University.
- Snyder, L. V.; Daskin, M. S. (2005). Reliability models for facility location: The expected failure cost case. *Transportation Science*, 39, 400-416.
- Snyder, L.; Daskin, M. (2005). Reliability models for facility location: The expected failure cost case. *Transportation Science*, 39(3), 400-416.
- Speier, C.; Whipple, J.; Closs, D.; Douglas Voss, M. (2011). Global supply chain design considerations: Mitigating product safety and security risks. *Journal of Operations Management*, doi:10.1016/j.jom.2011.06.003.
- Tang, C. (2006). Robust strategies for mitigating supply chain disruptions. *International Journal of Logistics: Research & Applications*, 9(1), 33-45.

- Waters, D. (2007). Supply Chain Risk Management: Vulnerability and Resilience in Logistics. Kogan Page.
- Weber, E. U.; Milliman, R. A. (1997). Perceived risk attitudes: Relating risk perception to risky choice. *Management Science*, 43(2), 123.
- Weick, K.; Roberts, K. (1993). Collective mind in organizations: Heedful interrelating on flight decks. *Administrative Science Quarterly*, 38, 357-381.
- Zio, E. (2009). Reliability engineering: Old problems and new challenges. *Reliability Engineering and System Safety*, 94, 125-141.

ANEXOS

PROGRAMACIÓN EN GAMS DE MODELO CFRM

Options

limrow = 10000

iterlim = 1000000;

Sets

i proveedores /1,2,3/

j distribuidores /1,2,3,4/

k retailers /1,2,3,4,5,6/

m mercados /1,2,3,4,5,6/;

Free variable

zminimizacion;

Positive variable

X(i,j) cantidad a transportar del proveedor i al distribuidor j

W(j,k) cantidad a transportar del distribuidor j al retailer k

Q(k,m) cantidad a transportar del retailer k al mercado m;

Binary variable

Y(i) variable binaria que indica si se abre el proveedor i

H(j) variable binaria que indica si se abre el distribuidor j

B(k) variable binaria que indica si se abre el retailer k;

Table costo_prov_dist(i,j)

| | 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|----|----|----|-----|
| 1 | 97 | 82 | 81 | 94 |
| 2 | 81 | 97 | 80 | 83 |
| 3 | 93 | 80 | 89 | 97; |

Table costo_dist_ret(j,k)

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|---|----|----|----|-----|----|-----|
| 1 | 91 | 93 | 99 | 88 | 99 | 95 |
| 2 | 96 | 82 | 84 | 100 | 98 | 80 |
| 3 | 97 | 84 | 96 | 99 | 83 | 82 |
| 4 | 94 | 94 | 81 | 92 | 83 | 92; |

Table costo_ret_mer(k,m)

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|---|----|----|----|----|----|-----|
| 1 | 97 | 87 | 95 | 81 | 87 | 81 |
| 2 | 96 | 84 | 87 | 85 | 88 | 83 |
| 3 | 87 | 92 | 93 | 94 | 94 | 99 |
| 4 | 99 | 85 | 92 | 97 | 97 | 95 |
| 5 | 85 | 90 | 84 | 97 | 81 | 89 |
| 6 | 93 | 86 | 97 | 80 | 89 | 86; |

Parameters

CY(i)/

| | |
|---|---------|
| 1 | 297000 |
| 2 | 317000 |
| 3 | 340000/ |

CH(j)/

| | |
|---|---------|
| 1 | 249000 |
| 2 | 226000 |
| 3 | 211000 |
| 4 | 246000/ |

CB(k)/

| | |
|---|---------|
| 1 | 181000 |
| 2 | 167000 |
| 3 | 143000 |
| 4 | 134000 |
| 5 | 124000 |
| 6 | 159000/ |

Dem(m)/

| | |
|---|------|
| 1 | 700 |
| 2 | 900 |
| 3 | 600 |
| 4 | 500 |
| 5 | 500 |
| 6 | 200/ |

CapP(i)/

| | |
|---|-------|
| 1 | 3000 |
| 2 | 3300 |
| 3 | 3700/ |

CapD(j)/

| | |
|---|-------|
| 1 | 2800 |
| 2 | 2350 |
| 3 | 2150 |
| 4 | 2700/ |

CapR(k)/
 1 2100
 2 1900
 3 1500
 4 1400
 5 1250
 6 1750/

ConfP(i)/
 1 0.99
 2 0.96
 3 0.92/

ConfD(j)/
 1 0.89
 2 0.96
 3 0.98
 4 0.91/

ConfR(k)/
 1 0.86
 2 0.88
 3 0.95
 4 0.96
 5 0.99
 6 0.91/;

Equations

FO

flujo_prov_dist(j)

flujo_dist_reta(k)

demanda(m)

cap_prov(i)

cap_dist(j)

cap_reta(k)

confiabilidad;

FO.. zminimizacion =e= sum(i,Y(i)*CY(i)) + sum(j,H(j)*CH(j)) + sum(k,B(k)*CB(k)) +
 sum((i,j),X(i,j)*costo_prov_dist(i,j)) + sum((j,k),W(j,k)*costo_dist_ret(j,k)) +
 sum((k,m),Q(k,m)*costo_ret_mer(k,m));

flujo_prov_dist(j).. sum(i, X(i,j)) =e= sum(k,W(j,k));

flujo_dist_reta(k).. sum(j,W(j,k)) =e= sum(m,Q(k,m));

demanda(m).. sum(k,Q(k,m)) =e= Dem(m);

cap_prov(i).. sum(j, X(i,j)) =l= CapP(i)*Y(i);

```

cap_dist(j).. sum(k, W(j,k)) =l= CapD(j)*H(j);

cap_reta(k).. sum(m, Q(k,m)) =l= CapR(k)*B(k);

confiabilidad.. (1-prod(i,(1-Y(i)*ConfP(i))))*(1-prod(j,(1-H(j)*ConfD(j))))*(1-prod(k,(1-
B(k)*ConfR(k)))) =g= 0.99;

model prueba/all;

solve prueba using MINLP minimizing zminimizacion;

```

PROGRAMACIÓN EN GAMS DE MODELO TERM

Options

```

limrow = 10000
iterlim = 1000000;

```

Sets

```

i proveedores /1,2,3/
j distribuidores /1,2,3,4/
k retailers /1,2,3,4,5,6/
m mercados /1,2,3,4,5,6/;

```

Free variable

```

zminimizacion;

```

Positive variable

```

X(i,j) cantidad a transportar del proveedor i al distribuidor j
W(j,k) cantidad a transportar del distribuidor j al retailer k
Q(k,m) cantidad a transportar del retailer k al mercado m;

```

Binary variable

```

Y(i) variable binaria que indica si se abre el proveedor i
H(j) variable binaria que indica si se abre el distribuidor j
B(k) variable binaria que indica si se abre el retailer k;

```

Table costo_prov_dist(i,j)

| | 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|----|----|----|-----|
| 1 | 97 | 82 | 81 | 94 |
| 2 | 81 | 97 | 80 | 83 |
| 3 | 93 | 80 | 89 | 97; |

Table costo_dist_ret(j,k)

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|---|----|----|----|-----|----|-----|
| 1 | 91 | 93 | 99 | 88 | 99 | 95 |
| 2 | 96 | 82 | 84 | 100 | 98 | 80 |
| 3 | 97 | 84 | 96 | 99 | 83 | 82 |
| 4 | 94 | 94 | 81 | 92 | 83 | 92; |

Table costo_ret_mer(k,m)

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|---|----|----|----|----|----|-----|
| 1 | 97 | 87 | 95 | 81 | 87 | 81 |
| 2 | 96 | 84 | 87 | 85 | 88 | 83 |
| 3 | 87 | 92 | 93 | 94 | 94 | 99 |
| 4 | 99 | 85 | 92 | 97 | 97 | 95 |
| 5 | 85 | 90 | 84 | 97 | 81 | 89 |
| 6 | 93 | 86 | 97 | 80 | 89 | 86; |

Parameters

CY(i)/

| | |
|---|---------|
| 1 | 297000 |
| 2 | 317000 |
| 3 | 340000/ |

CH(j)/

| | |
|---|---------|
| 1 | 249000 |
| 2 | 226000 |
| 3 | 211000 |
| 4 | 246000/ |

CB(k)/

| | |
|---|---------|
| 1 | 181000 |
| 2 | 167000 |
| 3 | 143000 |
| 4 | 134000 |
| 5 | 124000 |
| 6 | 159000/ |

Dem(m)/

| | |
|---|------|
| 1 | 700 |
| 2 | 900 |
| 3 | 600 |
| 4 | 500 |
| 5 | 500 |
| 6 | 200/ |

CapP(i)/

| | |
|---|-------|
| 1 | 3000 |
| 2 | 3300 |
| 3 | 3700/ |

CapD(j)/

| | |
|---|-------|
| 1 | 2800 |
| 2 | 2350 |
| 3 | 2150 |
| 4 | 2700/ |

CapR(k)/
1 2100
2 1900
3 1500
4 1400
5 1250
6 1750/

ConfP(i)/
1 0.99
2 0.96
3 0.92/

ConfD(j)/
1 0.89
2 0.96
3 0.98
4 0.91/

ConfR(k)/
1 0.86
2 0.88
3 0.95
4 0.96
5 0.99
6 0.91/;

Equations

FO

flujo_prov_dist(j)

flujo_dist_reta(k)

demanda(m)

cap_prov(i)

cap_dist(j)

cap_reta(k)

confiabilidad;

FO.. zminimizacion =e= sum(i,Y(i)*CY(i)) + sum(j,H(j)*CH(j)) + sum(k,B(k)*CB(k)) +
sum((i,j),X(i,j)*costo_prov_dist(i,j)) + sum((j,k),W(j,k)*costo_dist_ret(j,k)) +
sum((k,m),Q(k,m)*costo_ret_mer(k,m));

flujo_prov_dist(j).. sum(i, X(i,j)) =e= sum(k,W(j,k));

flujo_dist_reta(k).. sum(j,W(j,k)) =e= sum(m,Q(k,m));

demanda(m).. sum(k,Q(k,m)) =e= Dem(m);

cap_prov(i).. sum(j, X(i,j)) =l= CapP(i)*Y(i);

```

cap_dist(j).. sum(k, W(j,k)) =l= CapD(j)*H(j);

cap_reta(k).. sum(m, Q(k,m)) =l= CapR(k)*B(k);

confiabilidad.. (1-prod(i,(1-Y(i)*ConfP(i))))*(1-prod(j,(1-H(j)*ConfD(j))))*(1-prod(k,(1-
B(k)*ConfR(k)))) =g= 0.99;

model prueba/all;

solve prueba using MINLP minimizing zminimizacion;

```